

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева

ПАХТ-2025

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ СЕМИНАР,
ПОСВЯЩЕННЫЙ 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
Ю. И. ДЫТНЕРСКОГО**

Москва, РХТУ им. Д.И. Менделеева
10 – 11 апреля 2025 года

Материалы конференции

Москва
2025

УДК 66.02
ББК 35.11
П12

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой процессов и аппаратов химической технологии
Российского химико-технологического университета
Равичев Л. В.

член-корреспондент РАН, доктор технических наук, председатель совета
РАН по химической технологии
Вошкин А. А.

П12 **ПАХТ-2025: Международный научно-практический семинар, посвященный 100-летию со дня рождения Ю. И. Дытнерского. Материалы конференции.** – М.:РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2025. – 456 с.
ISBN 978-5-7237-2195-1

Сборник содержит материалы докладов, представленных на Международный научно-практический семинар, посвященный 100-летию со дня рождения Ю. И. Дытнерского "ПАХТ-2025". Основными проблемно-тематическими направлениями семинара стали: актуальные проблемы процессов и аппаратов химической технологии; мембранная технология; вопросы преподавания дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии» в профильных вузах.

Сборник представляет интерес для научно-технических работников, преподавателей, аспирантов и студентов.

УДК 66.02
ББК 35.11

ISBN 978-5-7237-2195-1

© Российский химико-технологический
университет им. Д. И. Менделеева, 2025

Организационный комитет конференции:

Е.В. Румянцев, д.х.н., и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева – председатель оргкомитета

заместители председателя оргкомитета:

Л.В. Равичев, д.т.н., заведующий кафедрой ПАХТ РХТУ им. Д.И. Менделеева

Е.В. Хайдуков, д.ф.-м.н., проректор по науке и инновациям РХТУ им. Д.И. Менделеева

Члены оргкомитета:

Г. Г. Каграманов, д.т.н., заведующий кафедрой мембранной технологии РХТУ им. Д.И. Менделеева

А. А. Вошкин, д.т.н., ИОНХ РАН

А. В. Волков, д.х.н., ИНХС РАН

Н.Ф. Кизим, д.х.н., заведующий кафедрой фундаментальной химии НИ РХТУ им. Д. И. Менделеева

А. В. Клинов, д.т.н., заведующий кафедрой ПАХТ КНИТУ

Р. Ш. Абиев, д.т.н., СПбГТИ(ТУ)

М. К. Захаров, д.т.н., РТУ МИРЭА

М. К. Кошелева, к.т.н., РГУ им. А. Н. Косыгина

Ответственный секретарь:

С. И. Ильина, к.т.н., РХТУ им. Д. И. Менделеева

Председатель программного комитета секции «Процессы и аппараты химической технологии»:

А. А. Вошкин, д.т.н., член-корр., заместитель директора по научной работе, заведующего лабораторией теоретических основ химической технологии ИОНХ РАН

Сопредседатель программного комитета секции «Мембранная технология»:

И. В. Воротынцев, д.т.н., профессор кафедры физической химии РХТУ им. Д. И. Менделеева

Г. Г. Каграманов, д.т.н., заведующий кафедрой мембранной технологии РХТУ им. Д. И. Менделеева

Сопредседатель программного комитета круглого стола «Актуальные вопросы развития процессов и аппаратов химической технологии: задачи и перспективы»:

Е. В. Румянцев, д.т.н., и.о. ректора РХТУ им. Д. И. Менделеева

Л. В. Равичев, д.т.н., заведующий кафедрой ПАХТ РХТУ им. Д. И. Менделеева

Организационный комитет конференции выражает благодарность
учредителям конференции:

Российская академия наук

А также организациям, сотрудники которых приняли участие в работе
научно-практического семинара

РТУ МИРЭА Российский технологический университет

ФГБОУ ВО Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина

ФГБОУ ВО Бийский технологический институт — филиал
государственного образовательного учреждения «Алтайский
государственный технический университет им. И. И. Ползунова»

ФГБОУ ВО Уфимский государственный нефтяной технический
университет

Ташкентский химико-технологический институт

ФГБОУ ВО Ивановский государственный химико-технологический
университет

ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический
университет

Азербайджанский Государственный Университет Нефти и
Промышленности

ФГБОУ ВО Донбасский государственный технический университет

ФГБОУ ВО Иркутский национальный исследовательский технический
университет

ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский
технологический университет (бывш. КГТУ, КХТИ)

ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет — МСХА
им. К. А. Тимирязева-Институт механики и энергетики им В.П. Горячкина
НИЦ "Курчатовский институт"

ФГАОУ ВО Московский политехнический университет

Филиал РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина в городе Ташкенте

ФГБОУ ВО Белгородский Государственный Технологический
Университет им. В.Г. Шухова

Атырауский университет нефти и газа имени Сафи Утебаева
ФГБОУ ВО Тамбовский государственный технический университет
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный технологический
институт (технический университет)
ФГБОУ ВО Ярославский государственный технический университет
ФГАОУ ВО Южно-Уральский государственный университет
ФГАОУ ВО Томский политехнический университет
ФГБОУ ВО Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М.
Бербекова
ФГАОУ ВО РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина
ФГБОУ ВО Владимирский государственный университет им. Александра
Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
Гулистанский государственный университет
ФГБОУ ВО Дзержинский политехнический институт Нижегородского
государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева
Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека
МГТУ им.Н.Э.Баумана
Новомосковский институт ФГБОУ ВО "Российский химико-
технологический университет имени Д.И. Менделеева"

С благодарностью,

Организационный комитет

Факультет Цифровых технологий и химического инжиниринга

РХТУ им. Д. И. Менделеева

Содержание

Актуальные проблемы процессов и аппаратов химической технологии

Аганичева И.В., Яшин В.Е.

Эжектирование пара вторичного вскипания для энергосбережения в паровых системах.....15

Алешин Д.А., Захаров С.Л.

Проектирование, изготовление и испытание корпусного аппарата с сальниковыми коробками для жестких полупроницаемых поверхностей цилиндрической формы с учетом динамики процесса в программе SOLIDWORKS 3D CAD.....25

Артиков А., Усмонов Б.Ш., Шодиева М.И.

Системное мышление в анализе процессов и аппаратов на примере солнечной сушильной установки.....29

Атласкина М.Е., Смородин К.А., Крючков С.С., Маркин З.А.,
Воротынцев И.В.

Каталитическое превращение CO₂ в ценные продукты циклические карбонаты.....34

Бахаева Д.Д., Капанова А.Б., Воронцов А.А., Егоров В.С.

Стохастический анализ смещения зернистых компонентов в аппарате непрерывного действия.....39

Беляева Ю.А., Супрунова Е.А.

Роль электротехники и электроники в образовательном процессе подготовки специалистов химической промышленности.....44

Быков В.И., Ильина С.И., Равичев Л.В., Ситников И.А.

Оценка коэффициентов уравнений, полученных из уравнения переноса субстанции.....48

Быков В.И., Ильина С.И., Касаткин А.М.

Применимость текущих инструментов на основе искусственного интеллекта в задачах химической технологии.....52

Валеев А.Р., Чуракова С.К.

Сравнительный анализ некоторых конструкций устройств ввода жидкой фазы методом CFD-моделирования.....58

Вишняк Д.Д., Кольцова Э.М., Женса А.В., Гаврилова Н.Н. Применение вариационных принципов для агрегативной устойчивости наночастиц оксида церия.....	62
Вязьмин А.В., Шумова Н.В., Королев Е.К., Христолюбова Е.Г. Некоторые методы и подходы к аппаратурному оформлению процесса объемного культивирования живых микроорганизмов в геле.....	67
Ганиева С.У., Худойбердиева Н.Ш., Сагитов А.М., Нурмухамедов Х.С., Каюмов А.А. Влияние отношения жидкости к газовой фазе на гидравлическое сопротивление вихревого циклона.....	73
Ганижонов Д.И., Исмаилов О.Ю. Изучение влияния гидродинамических параметров сырьевых потоков на тепловую эффективность.....	77
Голубина Е.Н., Кизим Н.Ф., Башлаев Л.А. Интенсификация экстракции рзэ путем колебательного воздействия на переходный слой.....	81
Грызунов А.В., Верлока И.И., Капранова А.Б. Применение параметрического моделирования деталей дросселирующего узла осевого клапана для оценки гидравлического сопротивления.....	86
Демкин К.М., Трубкина А.А., Комарова Д.С., Цыганков П.Ю. Процессы массопереноса и кинетика сверхкритической экстракции эфирных масел лаванды.....	91
Диссанайке К., Абдуллаева В.Т., Нурмухамедов Х.С., Каримов К.Ф., Самадий М.С. К эффективности применения метода мгновенного сброса давления при переработке сырья аграрного сектора.....	96
Иванов Р.Н., Носов Г.А., Елиневская Л.С. Определение коэффициента теплопередачи в бисерных мельницах.....	102
Исаев М.В., Кошелева М.К., Шалунов А.В. Энергоресурсоэффективный способ сушки в химической технологии отделки тканей.....	107
Исмаилов О.Ю., Исаматова Д.Н. Сравнительный анализ биодизеля с традиционным дизельным топливом...	112
Назаров В.И., Макаренков Д.А., Калачева В.Р., Попов А.П. Оценка ресурсного потенциала захороненных отходов Садонского свинцово-цинкового комбината (хвостохранилищ) и вопросы экологической безопасности.....	116

Калгашкин Н.И., Вязьмин А.В., Разин С.А., Таран Ю.А., Стрельникова В.О., Фуфаева В.М., Власова А.М. Технологии получения современных видов удобрений пролонгированного действия.....	120
Карабасова Н. А., Кайрлиева Ф.Б., Базарова Ж.С. Изучение модернизации установки замедленного коксования Атырауского НПЗ.....	124
Кислюк А.С., Сергеева А.М., Тарасов И.В., Сиротин И.С., Рохманенков А.С. Подходы многомасштабного компьютерного моделирования газофазного реактора полимеризации альфа-олефинов.....	128
Кольцова Э.М., Бабкин М.А., Попова Н.А., Женса А.В. Фундаментальные основы для моделирования процессов измельчения.....	135
Кротова М.В., Поворов А.А., Липин А.Г., Липин А.А. Извлечение соляной кислоты из отработанного травильного раствора.....	142
Назаров В.И., Макаренков Д.А., Кузнецова Н.А., Попов А.П., Калачева В.Р. Основные закономерности процессов гранулирования методами окатывания неорганических и органических порошков с различной морфологией.....	146
Макушева И.В., Абиев Р.Ш. Экспериментальное исследование и численное моделирование гидродинамики в микрореакторах с тангенциальным, радиальным и осевым вводом потоков.....	150
Мередова Х.А., Халлаев Х.Х. Способы переботки фосфогипса и природного гипса в безотходную продукцию.....	154
Минаков Ф.М., Соломатин А.Е., Захаров С.Л. Проектная разработка, изготовление и испытание аппарата очистки с нагревательным элементом.....	159
Минченков Н.Д., Чуракова С.К. Дифференциальное уравнение теплопроводности и конвективного теплообмена в цилиндрических координатах и его практические приложения.....	163
Морозов М.Д., Матвеева О.А. Совершенствование процессов подготовки газа на заводах СПГ.....	169
Мошин А.А., Румянцев Н.Г., Голованов И.Ю., Некрасов Д.А. Совершенствование аппаратурного оформления культивирования клеток в гидрогелевых материалах применительно к технологиям 3D-биопечати.....	173

Немерюк А.М., Назаров В.И., Попов А.П., Макаренков Д.А., Калачева В.Р. Особенности технологии утилизации литиевых аккумуляторов со смешанным катодом и с получением металлического никеля селективным восстановлением.....	177
Нестерова А.В., Маслова В.В., Носырев М.А., Ильина С.И., Равичев Л.В. Электроперенос в химической технологии.....	182
Носов Г.А., Уваров М.Е., Багаутдинов Н.П. Использование тепловых насосов закрытого типа при ректификации гетероазеотропных смесей.....	186
Нуралие Ш.Б., Нурмонов С.Э. Выделение полисических ароматических углеводородов из побочных продуктов отходов пиролиза.....	192
Нуриллаева А.А., Рахмонова М.И., Бекбаева Ф.У., Мавлонов Э.Т., Нурмухамедов Х.С. Теплопередачи в ректификационной колонне с трубчато-решетчатыми тарелками.....	197
Платонов А.С., Хасанов К.Ф., Ерохина В.А., Закирова А.Ш. Рекомендательная система на базе оптимизированных цифровых двойников.....	202
Пушкарская Д.В., Черкашина Н.И., Любушкин Р.А., Рыжих Д.А. Оптимизация концентрации инициатора в химическом процессе суспензионной полимеризации.....	207
Рахманова М.И., Абдулахатов Э.Э., Нормуминов А.Б., Мавлонов Э.Т., Нурмухамедов Х.С. Зависимость коэффициента теплопередачи от скорости потока в холодильной зоне абсорбционной колонны.....	211
Рудобашта С.П., Карташов Э.М., Зуева Г.А. Электромагнитная сушка материалов.....	216
Салякин А.Е., Пономарев С.А., Гарифуллина Э.В., Бронская В.В., Мухаметзянова А.Г. Нейросетевое моделирование установки первичной переработки нефти.....	220
Самойлов Н.А. Методические основы математического моделирования дифференциальной гидроочистки дизельного топлива как поликомпонентного реакционного процесса.....	224
Сидоров Н. Э., Абиев Р.Ш. Сравнение интегральных значений скорости диссипации энергии в аппаратах механического перемешивания с центробежно-пульсационными мешалками.....	231

Силина А.М., Хаванская Е.О., Захаров С.Л. Разработка в системе Компас 3D, изготовление и испытание опытного образца аппарата с уплотнением основных рабочих элементов по типу «плоскость-плоскость».....	235
Султанов Ж.В., Хакимова Г. Н., Нурмухамедов С.Х., Абдуллаев А.Ш., Матчанов Ш.К. Эффективность измельчения угля Шаргунского месторождения в аппаратах турболопастного типа.....	240
Ташбаев Т.Э., Шералиева О.А., Нигмаджанов С.К., Нурмухамедов С.Х., Усманов Б.С. Повышение качества и гранулирование фосфогипса в турбулизированном слое.....	245
Тихомиров В.А., Ермолов А.В., Бахаева Д.Д., Капранова А.Б. Совершенствование процесса диспергирования твердого осадка в бисерной мельнице погружного типа с элементами прототипирования конструкции... 	250
Туркова Е.В., Кичатов К.Г., Просочкина Т.Р. Программно-аппаратный комплекс для измерения и контроля расхода воды в термостате.....	255
Федоров А.В., Глебов М.Б. Каталитическое окисление нефтяных сульфидов дизельной фракции при производстве судовых топлив.....	259
Филатов М.А., Левченко Э.П., Павленко А.Т., Ткачев Р.Ю., Карпук А.В. Обоснование работы электромагнитной мельницы для приготовления суспензий.....	263
Хайдарова Л.М., Маннанов Т.И. Исследование гидродинамики ситчатой тарелки методом CFD-анализа.....	269
Хамадалиев Р.Ф., Кичатов К.Г., Просочкина Т.Р. Цифровой и экспериментальный инжиниринг нефтегазохимических процессов в УГНТУ.....	273
Хурматов А.М., Ахмедова К.Ш., Худойбергенов А.А. Фракционная перегонка пиролизного дистиллята.....	277
Шишанов М.В., Кук Х.Г., Геворкян Э.Л., Друзьяк С.Н., Ботнев А.Ю. Моделирование кинетики получения изофлорона в различных реакторах.....	280

Мембранная технология.

Баландин Д.М., Горячий Н.В., Боровкова О.Ю. Апробация мембранных процессов при глубокой переработке растительной сыворотки.....	284
Гаврикова Ю.А., Рудобашта С.П. Мембранная дистилляция: инновационный подход к получению пресной воды в крыму.....	289
Грудковская В.К., Грушевенко Е.А., Сафронов П.А., Петрова И.В., Баженов С.Д. Влияние предварительной фильтрации промышленного алканоламинового абсорбента на эффективность их электромембранной регенерации.....	292
Елагина А.А., Фарносова Е.Н. Современные проблемы состояния атмосферного воздуха в промышленных городах РФ и способ их решения.....	297
Захаров С.Л. Математическая модель распределения пор по значениям их величин в обратноосмотических мембранах.....	303
Каталевский А.Д., Смирнова Н.Н. Ультрафильтрационные мембраны на основе ароматических сополиамидов.....	309
Кириченко Н.Б. Численно-аналитическое решение задач о стационарном и нестационарном пограничном слое в баромембранных процессах.....	313
Ковалева А.А., Кулевец П.С., Левданский А.Э. Разработка способов флотационного разделения полимерных смесей.....	319
Маслова В.В., Нестерова А.В., Титов А.А., Ильина С.И., Равичев Л.В. К изучению влияния различных параметров на электродиализное разделение.....	329
Пак Д.Л., Рохманка Т.Н., Голубев Г.С., Грушевенко Е.А. Первапорационное концентрирование биобутанола: разработка.....	333
Назаров В.И., Макаренков Д.А., Попов А. П., Кузнецова Н.А., Бурковский С.С. Особенности процесса переработки комплексных химических источников тока баромембранными методами для концентрирования литийсодержащих растворов.....	337
Рассохина А.В., Раева А.Ю., Анохина Т.С., Хаширова С.Ю., Борисов И.Л. Высокопроницаемые половолоконные мембраны из полифениленсульфона для ультрафильтрации водных сред.....	342

Русин А.И., Прохорова М.А., Захаров С.Л. Конструирование аппарата с сальниковым уплотнением основных рабочих элементов в виде цилиндрических пористых трубок для очистки растворов.....	347
Сморodin К.А., Крючков С.С., Атласкин А.А., Сысоев А.А., Атласкина М.Е., Воротынцев И.В. Исследование режимов работы мембранного каскада «непрерывная мембранная колонна» для задачи разделения воздуха.....	351
Стасенко А.И., Каграманов Г.Г., Бланко-Педрехон А.М., Шибанов И.В. Перспективы развития технологии извлечения лития из гидроминерального сырья.....	356
Сысоев А.А., Атласкин А.А., Атласкина М.Е., Крючков С.С., Смородин К.А., Воротынцев И.В. Получение полимерной пленки из полиэфиримида и возможность ее использования для выделения гелия с помощью мембранного газоразделения.....	362
Таха Б.С., Алексеева Н.В. Вольтамперная характеристика электродиализного разделения водных растворов в присутствии микрочастиц активированного угля.....	366
Токарев П.О., Грудковская В.К., Козлова А.А., Шалыгин М.Г., Грушевенко Е.А. Разработка высокоселективной мембраны на основе сшитого полидecilметилсилоксана для рекуперации паров органических растворителей.....	370
Фазлыев А.Р., Латыпов Д.Р., Клинов А.В. Разделительные характеристики одно- и двухслойных полимерных пермеационных мембран.....	373
Федарович Е.Г., Левданский А.Э., Нурмухамедов Х.С., Султанов Ж.В. Механическая переработка отходов производства терморeактивных стеклопластиков.....	377
Черепанов А.П., Клишкин М.А., Ломакин С.П. Мембранные методы осушки газов.....	381
Шворобей Ю.В., Маркелов А.В., Небеская А.П., Юшкин А.А., Волков В.В., Волков А.В. Применение промышленных и лабораторных фильтрационных мембран для очистки отработанных моторных масел.....	385

Вопросы преподавания дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии»

Анашкин И.П.

Язык программирования julia в образовании и инженерных расчетах по процессам и аппаратам химической технологии.....389

Богданов И.А., Киргина М.В., Алтынов А.А.

Преподавание дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии» в ВУЗе: запрос индустрии и возможности университетов.....393

Гилевская О.В., Усачева У.О.

Реализация образовательной деятельности у студентов среднего профессионального образования на примере дисциплины «Процессы и аппараты».....397

Кизим Н.Ф., Григорьев В.И.

Междисциплинарный подход в реализации курса процессов и аппаратов химической технологии.....401

Климкин М.А., Ломакин С.П., Просочкина Т.Р., Табаев А.М.

Применение социальных сетей для популяризации дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии» на примере группы из социальной сети «ВКонтакте»: «ПАХТ в массы».....405

Клинов А.В., Дьяконов С.Г., Дьяконов Г.С., Фарахов М.И.

Научная и педагогическая школа процессов и аппаратов химической технологии в Казани. История, достижения, современное состояние.....410

Кожемова К.Р., Алтуева А.М., Бесланеева З.Л., Виндижева А.С., Кушхова С.В., Зашакуева А.А.

Интеграция принципов синтеза в обучение предмету "Процессы и аппараты химической технологии".....414

Левданский А.Э., Калишук Д.Г.

«Инженерия химико-технологических процессов» – новая специальность подготовки магистров в Белорусском государственном технологическом университете.....418

Липин А.Г., Липин А.А.

Опыт преподавания дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии» в ивановском государственном химико-технологическом университете.....422

Рузанов С.Р.

Некоторые аспекты постановки курса "процессы и аппараты химической технологии".....427

Селезнев А.В.

Изучение дисциплины «Мембранные процессы» с использованием задач и форм самостоятельной работы студентов творческой направленности.....436

Фролова И.В.

Влияние мотивации на процесс изучения курса «Процессы и аппараты химической технологии».....439

Шуваева А.С., Шадрина Е.М.

Различные подходы к решению многоуровневых задач в технических дисциплинах.....444

Щетинина Ю.В., Рештаненко А.А., Голованов И.Ю.

Потенциал использования интерактивных технологий в литературе по процессам и аппаратам химической технологии.....448

УДК 66.012, 621.65

Аганичева И.В., Яшин В.Е.

Эжектирование пара вторичного вскипания для энергосбережения в паровых системах

Аганичева Ирина Виткововна – студентка; irina.aganicheva@mail.ru

Яшин Виктор Евгеньевич – ассистент кафедры процессов и аппаратов химической технологии; ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В тезисах рассмотрены варианты технических решений по эжектированию пара вторичного вскипания на примере обвязки калорифера вентиляционной установки, проработаны 4 варианта обвязки, дана оценка затрат и экономический эффект решений.

Ключевые слова: вторичный пар, энергосбережение в паровых системах, эжектор, низкопотенциальный пар

Secondary boiling steam ejection for energy saving in steam systems

Aganicheva I.V.¹, Yashin V.E.¹.

¹ D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The theses discusses variants of technical solutions for ejecting secondary boiling steam using the example of strapping a heater in a ventilation unit, 4 strapping options have been worked out, and an estimate of the costs and economic effect of the solutions has been given.

Key words: secondary steam, energy saving in steam systems, ejector, low-potential steam

Введение

Повышение энергоэффективности паровых систем, актуальная задача энергетики. В качестве теплового агента наибольшее распространение в химической промышленности получил водяной пар. Его важным преимуществом является возможность задания температуры точки насыщения методом дросселирования. Пар получают в заводских котельных, как правило, при давлении 22 МПа и температуре 260°C (перегретый пар) и распределяют по потребителям (цехам, установкам), на которых осуществляется снижение давления и увлажнение. В потребителях тепла используется насыщенный водяной пар давлением 1,5..20 бар изб. Паровой конденсат собирается в емкостях, находящихся под атмосферным давлением, охлаждается до температуры 60..80°C и возвращается в котельную.

Для наиболее полного использования энергии водяного пара предлагается [1] использовать тепло парового конденсата и тепло пара вторичного вскипания [6], называемыми низкопотенциальными теплоносителями. Их использование имеет ряд трудностей: в технологическом процессе зачастую не оказывается потребителей низкопотенциальной тепловой энергии соответствующей мощности; использование для отопления помещений неудобно из-за различного режима работы производственных установок и отопительных систем; системы обогрева производственных установок могут включать элементы противоаварийной защиты (ПАЗ) и их усложнение при увязывании с неответственными системами нежелательно.

Известны решения по обвязке потребителя тепла (например, калорифера) с пароструйным эжектором [9]. Однако экономия пара в таком случае незначительна [10]. Основным смыслом такого решения [12, 13] – улучшение работы теплообменника.

Изготовители пароструйных термомокомпрессоров рекомендуют такую схему обвязки [10], рис. 1, где давление ижектируемого пара незначительно ниже давления смеси.

Известно решение по использованию пара вторичного вскипания в том же потребителе тепла (пара) методом эжектирования. Поставщик пароструйного эжектора, заявляет о его способности сэкономить до 5% расхода пара, при этом описываются другие преимущества такой схемы обвязки:

- Теплообменник постоянно продувается паром, отсутствуют застойные зоны, залитые жидкостью, которые в случае работы калорифера в зимний период могут замёрзнуть и разорвать трубки.
- Частично используется тепло пара вторичного вскипания, т.к. давление в сепараторе пара ниже давления в теплообменнике из-за аэродинамического сопротивления.
- Не теряется впустую эксергия перегретого пара при дросселировании.

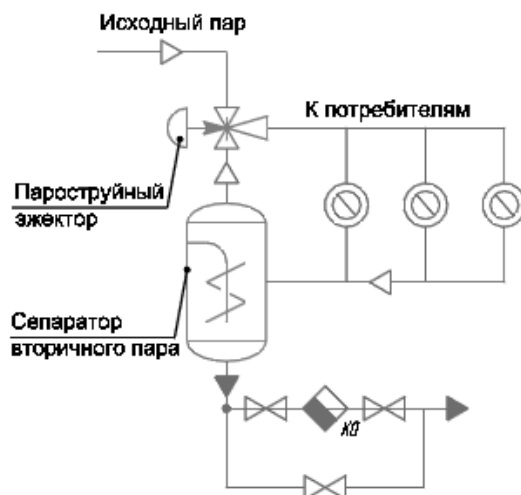


Рисунок 1 - Рекомендуемая схема с регулируемым пароструйным эжектором

При этом такая схема обвязки дороже, т.к. используется регулируемый паровой эжектор (пароструйный компрессор), который должен быть защищён дополнительной арматурой от гидравлических ударов при попадании в него жидкости. В такой схеме перепад давления в сепараторе пара и в теплообменнике не более 0,5 бар, поэтому экономия пара незначительна. Рекомендуется использовать коэффициент эжекции около 1,4, т.е. расход пара, подаваемого в потребитель, в 2,4 раза выше конденсирующегося пара, и 58% из него не конденсируется в потребителе, а направляется на циркуляцию в эжектор.

Если использовать рекомендуемую производителем схему обвязки (рис. 1), то при давлении смеси 6 бар, давлении инжектируемого пара 5,5 бар, доля вторичного пара в смеси составит 0,67% [2].

К недостаткам схемы также можно отнести:

- Использование «универсального» пароструйного эжектора, неоптимизированного для данных расходов и давлений, и даже для потоков пара (предлагается универсальный корпус для пара воды и воздуха).
- Необходимость устанавливать предохранительные устройства для защиты эжектора от гидравлических ударов.
- Отсутствует увлажнение пара после редуцирования (хотя считается, что пар ближе к насыщенному, чем при редуцировании перегретого без увлажнения).
- Повышение коэффициента теплоотдачи со стороны пара, нивелируется низким коэффициентом теплопередачи со стороны воздуха, и не сказывается на общем коэффициенте теплопередачи, что не позволяет снизить площадь поверхности калорифера

Для более полного использования энергии пара, необходимо осуществлять вторичное вскипание при более низком давлении, а полученный пар эжектировать (компримировать, повышать давление) и использовать повторно. Если учесть, что паровой конденсат может быть охлаждён до температуры ниже температуры кипения воды при атмосферном давлении, то доля вторичного пара по отношению к пару, подаваемому в калорифер, может составить до 15% [2]. Расход пара, подаваемого в калорифер:

$$G_c = G_p + G_{и} \quad (1)$$

где G_p – массовый расход рабочего пара, подаваемого в эжектор, $G_{и}$ – массовый расход инжектируемого пара.

В таком случае, для эжектора вторичного пара не требуются высокие коэффициенты эжекции, максимальный необходимый для практического использования:

$$u = \frac{G_{и}}{G_p} = \frac{1}{\frac{1}{15\%} - 1} = 0,1765 \quad (2)$$

Доля вторичного пара, по отношению к пару, конденсирующемуся в теплообменнике, может быть определена по формуле:

$$f_{\text{BП}} = \frac{G_{\text{BП}}}{G_{\text{c}}} = \frac{c_{\text{B}} \cdot (T_{\text{HП}}^{\text{Pc}} - T_{\text{HП}}^{\text{Pi}})}{r_{\text{HП}}^{\text{Pi}}} \quad (3)$$

Тогда, с учетом использования пара вторичного вскипания, тепловая нагрузка калорифера:

$$Q = G_c \cdot r_{\text{HP}}^{\text{Pc}} = G_p \frac{1}{1 - f_{\text{HP}}} r_{\text{HP}}^{\text{Pc}} \quad (4)$$

На рисунке 2 принципиальная схема обвязки калорифера, используемая в аналогичных цехах, низкопотенциальные источники тепла не используются, принимаем за базовый вариант. Достоинства схемы: простая и проверенная схема обвязки. Недостатки: риск замерзания парового конденсата в калорифере, низкий коэффициент теплопередачи на участке выхода парового конденсата.

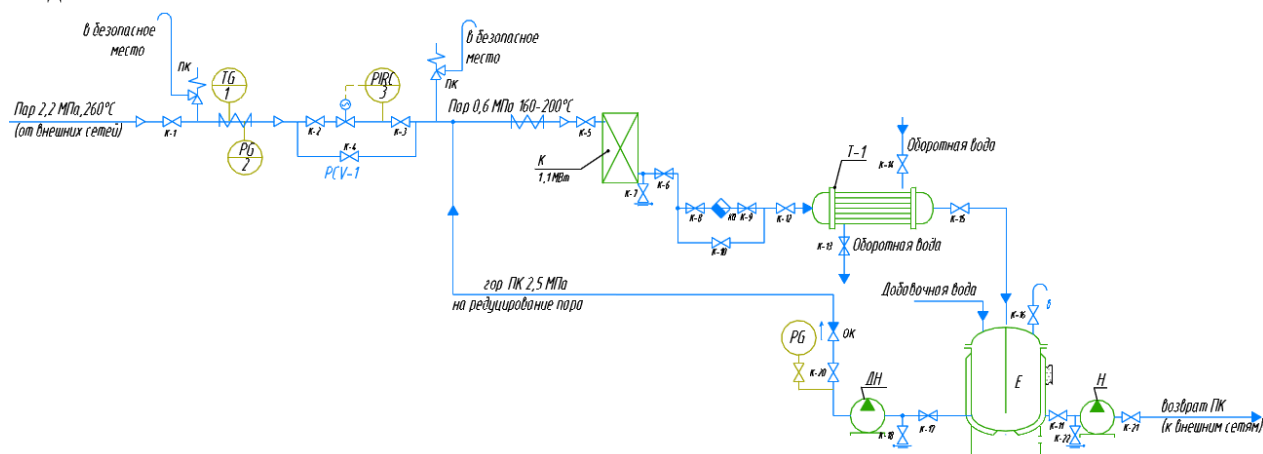


Рисунок 2 - Существующая схема обвязки калорифера приточной ветткaмepы

Массовый расход пара был найден по формуле:

$$m = \frac{Q}{r_{\text{нп}}^{\text{p}_c}} \quad (5)$$

где Q – тепловая нагрузка калорифера, $r_{\text{нп}}^{\text{pc}}$ – удельная теплота конденсации насыщенного пара при давлении смеси.

Поверхность теплообмена:

$$F = \frac{Q_{T0}}{K_{T0} \cdot \Delta t_{T0}} \quad (6)$$

$$\Delta t_{\text{T0}} = \frac{(T_{\text{HPI}}^{\text{P}} - t_{\text{O6.B}}^{\text{BX}}) - (T_{\text{HPI}}^{\text{P}} - t_{\text{O6.B}}^{\text{BYX}})}{\text{Ln}((T_{\text{HPI}}^{\text{P}} - t_{\text{O6.B}}^{\text{BX}})/(T_{\text{HPI}}^{\text{P}} - t_{\text{O6.B}}^{\text{BYX}}))} \quad (7)$$

$$\Delta t_{\text{TO}} = \frac{(T_{\text{HP}}^{\text{P}} - t_{\text{OB,B}}^{\text{BX}}) - (T_{\text{HP}}^{\text{P}} - t_{\text{OB,B}}^{\text{BbIX}})}{\text{Ln}((T_{\text{HP}}^{\text{P}} - t_{\text{OB,B}}^{\text{BX}})/(T_{\text{HP}}^{\text{P}} - t_{\text{OB,B}}^{\text{BbIX}}))} \quad (7)$$

Расход оборотной воды:

$$V_{\text{o6,B}} = \frac{Q_{\text{TO}}}{\rho \cdot c_{\text{B}} \cdot (t_{\text{o6,B}}^{\text{BbX}} - t_{\text{o6,B}}^{\text{BX}})} \quad (8)$$

На рисунке 3, схема обвязки калорифера, с паровым эжектором Baelz [10]. Используется универсальный регулируемый пароструйный инжектор. Достоинства схемы: ниже риск замерзания парового конденсата в калорифере, постоянный высокий коэффициент теплопередачи по всей поверхности калорифера. Недостатки: дорогостоящее импортное оборудование, небольшая экономия тепловой энергии.

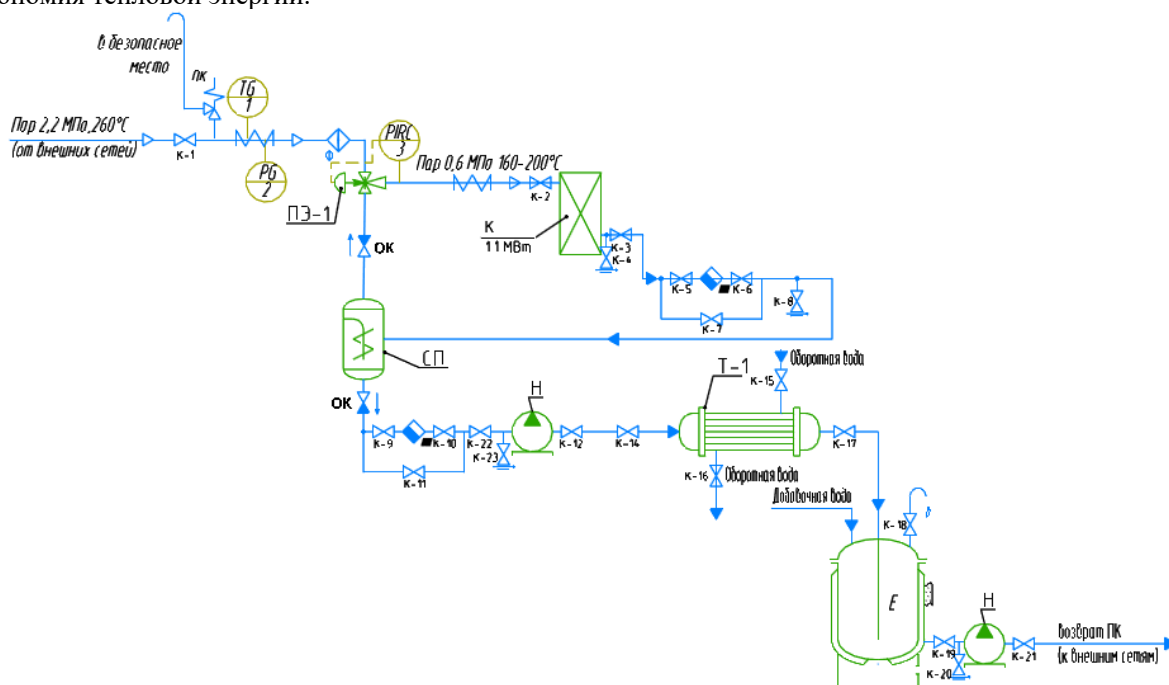
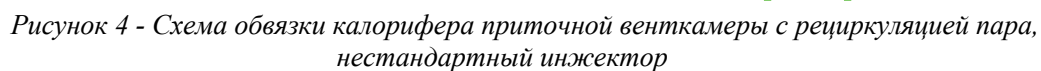


Рисунок 3 - Схема обвязки калорифера приточной ветткамеры с рециркуляцией вторичного пара, регулируемый пароструйный инжектор

$$m = \frac{Q}{r_{\text{нп}}^{\text{р.с}}} \cdot (1 - f_{\text{вп}}) \quad (9)$$

На рисунке 4, схема обвязки калорифера, с паровым эжектором индивидуального изготовления, используется отечественная запорно-регулирующая арматура. Достоинства и недостатки соответствуют схеме на рис. 3, кроме использования стандартного отечественного оборудования и недорогого в изготовлении инжектора без движущихся частей.



*Рисунок 5 - Схема обвязки калорифера приточной венткамеры с понижением давления
вторичного пара*

Расчетные нормы расхода ресурсов для схем 1 и 2 приведены в таблице 1.

Таблица 1

Нормы расходов ресурсов для схем 1 и 2

Наименование сырья, материалов, энергоресурсов	Ед. изм.	Схема 1			Схема 2			Стоимость	
Нагрузка		100%	50%	25%	100%	50%	25%		
Водяной пар	кг/ч	1895	947	474	1882	941	470	0,58	руб/кг
Вода	м³/ч	22,0	11,0	5,5	21,0	10,4	5,2	1,04	руб/м³
Электроэнергия	кВт*ч /т	1,75	1,4	2,5	0,75	0,4	2,5	9,45	руб / (кВт*ч)
Водяной конденсат	м³/ч	1,9	0,95	0,475	1,88	0,94	0,47		
Всего	руб/ч	1147,4	578,6	306,3	1129,3	564,8	304,1		
	руб/г	4 010 756 Р			3 932 154 Р				

Для схемы на рис. 4, необходимо изготовление инжектора с расчетным коэффициентом эжекции 1,4, степенью сжатия (отношение давления смеси к давлению инжектируемого потока) 1,1. Методика расчета такого газоструйного аппарата (рис. 6) приведена в [7].

Проведена проверка работы такого инжектора на меньших нагрузках в программе для расчетов методом вычислительной гидродинамики Solidworks Flow Simulation. Расчёты показывают, что уменьшение нагрузки достигается снижением давления рабочего пара, при этом коэффициент эжекции не уменьшается, эжектор показывает стабильную работу. Результаты расчетов CFD сходятся с результатами аналитической методики с погрешностью 11%.

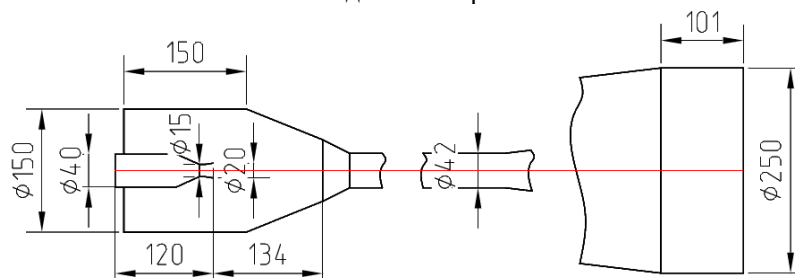


Рисунок 6 - Общий вид газоструйного инжектора с низкой степенью сжатия, с высоким коэффициентом эжекции, схема на рис. 4

Учитывалось, что при уменьшении нагрузки – уменьшении расхода рабочего пара, снижается перепад давления между давлением смеси, поступающим в калорифер и давлением в сепараторе конденсата и пара. Считая коэффициент аэродинамического сопротивления системы постоянным, можно определить перепад давления:

$$\Delta p = p_p - p_{\text{и}} = \zeta \frac{\rho_c v_c^2}{2} \quad (10)$$

Считая температуру пара в калорифере (насыщенный пар) и давление постоянными, перепад давления пропорционален массовому расходу смеси в квадрате, коэффициент пропорциональности находим из условия, что при 100% нагрузке перепад давления 0,5 бар.

Для схемы на рис. 5, с эжектором с высокой степенью сжатия, был проведен расчёт геометрических размеров по методике, представленной в [7], при этом, погрешность расчета составил 60%. Работоспособность эжектора проверялась расчётами CFD. Обнаружено что при снижении нагрузки до 50% от номинальной, для обеспечения коэффициента эжекции 0,2 необходимо увеличить давление эжектируемого пара до 4,3 бар, при этом снижается эффект экономии энергии при использовании пара вторичного вскипания. При нагрузке 25%, давление инжектируемого пара не менее 5 бар. Наиболее существенный эффект, до 7,5% экономии пара, возможен только на максимальной нагрузке.

Расчетные нормы расхода ресурсов для схем 3 и 4 приведены в таблице 2.

Таблица 2

Нормы расходов ресурсов для схем 1 и 2

Наименование сырья, материалов, энергоресурсов	Ед. изм.	Схема 3			Схема 4			Стоимость	
Нагрузка		100%	50%	25%	100%	50%	25%		
Водяной пар	кг/ч	1882	941	470	1752	941	467	0,58	руб/кг
Вода	м³/ч	21,0	10,4	5,2	10,2	10,4	4,9	1,04	руб/м³
Электроэнергия	кВт*ч /Т	0,75	0,4	2,5	0,4	0,4	1	9,45	руб / (кВт*ч)
Водяной конденсат	м³/ч	1,88	0,94	0,47	1,76	0,93	0,47		
Всего	руб/ч	1129,3	564,8	304,1	1038,8	564,8	287,6		
	руб/г	3 932 154 Р			3 787 972 Р				

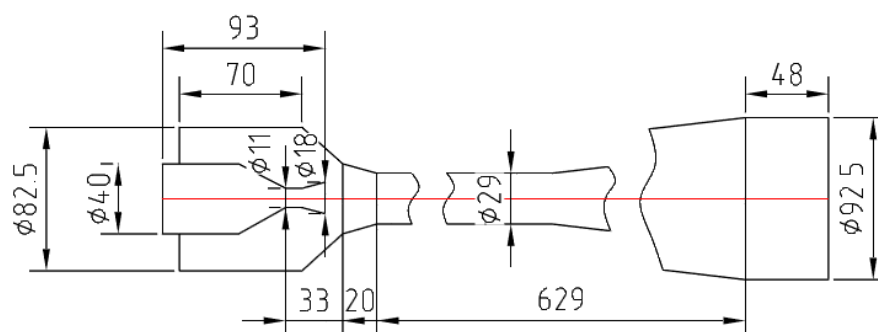


Рисунок 7 - Общий вид газоструйного эжектора с высокой степенью сжатия, с низким коэффициентом эжекции, схема на рис. 5

Для схемы на рис. 5, при проведении серии расчетов эжектора методом CFD, выполнена оптимизация размеров, результаты на рисунках 8-9.

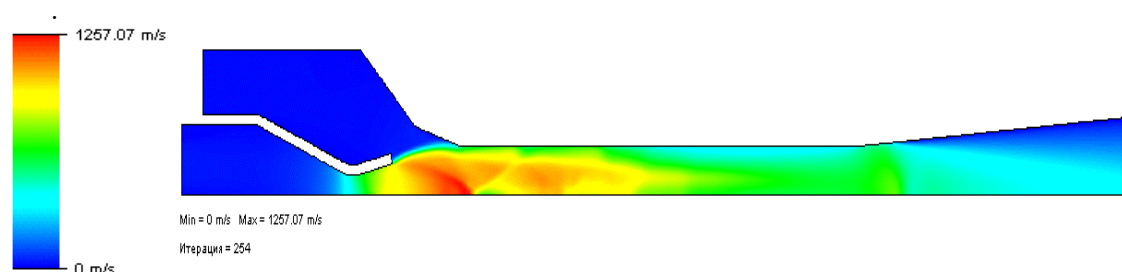


Рисунок 8 - Скорость пара в газоструйном эжекторе

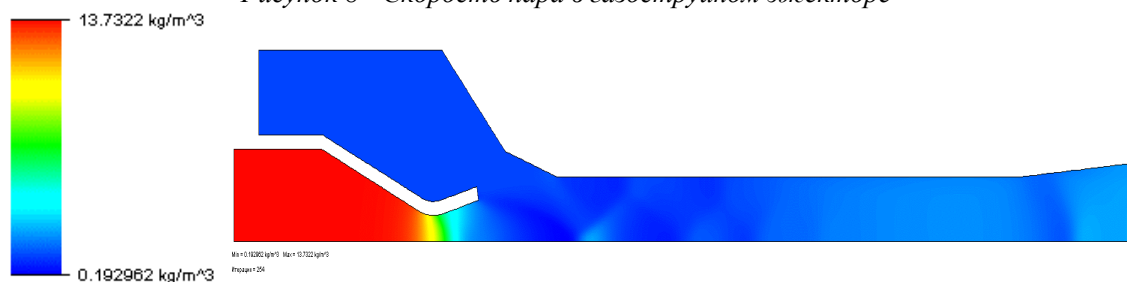


Рисунок 9 - Распределение плотности пара в газоструйном эжекторе

Результаты CFD расчета представлены в таблицах 3-4.

Таблица 3

Результаты CFD расчета для газоструйного инжектора, схема на рис. 4

Нагрузка	Массовый расход рабочего пара, кг/с	Массовый расход инжектируемого пара, кг/с	Средняя температура смеси, К	Массовый расход смеси, кг/с	Статическое давление рабочего пара, Па	Достижимый коэффициент эжекции
100%	0,1325	0,165139	501,0887	-0,29779	1854353	1,246329
50%	0,06625	0,124148	503,5045	-0,1904	950006,3	1,873925
10%	0,01325	0,023243	505,6613	-0,03649	609112,6	1,754166

Таблица 4

Результаты CFD расчета для газоструйного эжектора, схема на рис. 5

	Давление инжектируемого пара, бар	Массовый расход инжектируемого пара, кг/с	Средняя температура смеси, К	Массовый расход смеси, кг/с	Статическое давление рабочего пара, Па	Достижимый коэффициент эжекции	Массовый расход рабочего пара, кг/с
100%	2	0,1075	0,013791	483,3254	-0,15803	2984672	0,128285
50%	4,3	0,05375	0,011116	478,9349	-0,0649	1499306	0,206813
25%	5	0,026875	0,009968	429,7505	-0,04384	768218,2	0,370904

Экономический расчет

Калькуляция стоимости оборудования, приведена в таблице 5.

Таблица 5

Калькуляция стоимости оборудования

Поз.	Наименование	Кол.				Ед. измерения
		Сх.1	Сх.2	Сх.3	Сх.4	
К	Калорифер	1	1	1	1	459 360Р
Т-1	Теплообменник	1	1	1	0	614 592Р
Т-2	Теплообменник	0	0	0	1	506 880Р
Н	Насос	1	2	2	2	24 780Р
ДН	Насос высокого давления	1	0	0	0	45 643Р
Е	Емкость	1	1	1	1	250 000Р
ПЭ-1	Паровой эжектор	0	1	0	0	8 711 000Р
ПЭ-2	Паровой инжектор	0	0	1	0	184 943Р
ПЭ-3	Паровой эжектор	0	0	0	1	102 489Р
СП	Отделитель пара вторичного вскипания	0	1	1	1	100 000Р
К	Краны, вентили Ду100	21	22	26	29	15 000Р
КО	Конденсатоотводчики	1	2	2	2	30 000Р
ОК	Обратные клапаны	1	2	2	2	10 000Р
TG	Стрелочный термометр	1	1	1	1	1 000Р
PG	Стрелочный манометр	2	2	2	2	1 000Р
PIRC	Манометр	1	1	1	2	5 000Р
PCV	Клапан Ду15	0	0	0	1	58 140Р

PCV	Клапан Ду65	1	0	1	1	152 000Р
	ВСЕГО, руб	1 909 375	10 602 512	2 288 455	2 206 429	

Простой срок окупаемости оборудования, относительно первого (базового) варианта приведён в таблице 6.

Таблица 6

Окупаемость			
Варианты схемы	Экономия, руб/год	Дополнительные затраты, руб	Простой срок окупаемости, лет
Вариант 2	77 717 Р	8 693 137 Р	111,9
Вариант 3	77 717 Р	379 080 Р	4,9
Вариант 4	220 875 Р	297 054 Р	1,3

Заключение

Схема с эжектированием вторичного пара регулируемым пароструйным эжектором, не может рассматриваться как способ экономии энергозатрат, основной недостаток схемы – высокая стоимость регулируемого пароструйного эжектора. Её достоинства ограничиваются улучшением параметров характеристик теплообмена в калорифере.

Схема с эжектором без движущихся частей, вариант на рис. 4, так же не даёт заметной экономии энергии, но может быть реализована с меньшей стоимостью оборудования. Рекомендуется использовать данный вариант для обвязки калорифера вентиляционной установки приточной вентиляции

Схема с эжектором и дросселированием парового конденсата, позволяет сэкономить до 7,5% пара при максимальной нагрузке, однако при снижении нагрузки, эффективность существенно снижается. Данный вариант не рекомендуется для использования в отопительных паровых системах, однако, при использовании для обвязки технологического оборудования, работающего на максимальной производительности большую часть времени, может быть достигнута существенная экономия.

Список литературы

1. Минухин Л.А., Меньшенин Г.А. Исследование возможности создания высокоэффективных выпарных установок с тепловым насосом // Аграрное образование и наука. -2013.-№4
2. Шуб А.Г., Гулаков А.В. Эффективное использование пара вторичного вскипания // Пищевая промышленность. – 2007. – №10. – С. 56-57.
3. Барбасова Т.А., Дивнич П.Н. Определение достижимых коэффициентов инжекции и степени сжатия струйного парового компрессора // Вестник ЮУрГУ. – 2007. – №7. – с. 3-4
4. Моисеев В. Утилизация низкопотенциального пара в термокомпрессионных установках // Spirascop. –2012. – №2. – с. 2-3
5. Вардияшвили А.А., Саматова Ш.Ю., Абдуллаева К.Т., Зохилова Ш.М. Энергосбережение и энергоэффективность в системах пароснабжения // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы II Междунар. науч. конф. – 2014. – С. 53-55
6. Левин М.С. Использование отработавшего и вторичного пара и конденсата. М.: Энергия, 1971.
7. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1989.
8. Лебедев П.Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки. М.: Энергия, 1972.
9. Гилепп П.А. Сокращаем расход пара. Паровые эжекторы и термокомпрессоры [Электронный ресурс] // Вестник арматеростроителя: сайт. — URL: <http://mail.krani.su/publication/avtorski-stati/pa-gilepp-sokrashcham-raskhod-para-parovy-ezhektory-i-termokompressory/> (дата обращения 09.03.2025).
10. Steam Ejectors [Электронный ресурс] // Baelz automatic: сайт. — URL: <https://baelzna.com/products/ejectors/steam-ejectors/> (дата обращения 09.03.2025).
11. Традиционная схема регулирования температуры пароводяных нагревателей [Электронный ресурс] // АППЭК: сайт. — URL: <https://baelzna.com/products/ejectors/steam-ejectors/> (дата обращения 09.03.2025).

12. Рециркуляционная схема регулирования температуры пароводяных нагревателей [Электронный ресурс] // АППЭК: сайт. — URL: [https://energycontrol.spb.ru/appek.nsf/\(sitetree\)/DAF49FA5D48D36B94325817F003CEA4F?OpenDocument](https://energycontrol.spb.ru/appek.nsf/(sitetree)/DAF49FA5D48D36B94325817F003CEA4F?OpenDocument) (дата обращения 09.03.2025).

13. Сепаратор пара вторичного вскипания SEPS KERP 850 [Электронный ресурс] // KERP: сайт. — URL: <https://kerp.nt-rt.ru/images/manuals/SEPS850.pdf> (дата обращения 09.03.2025).

14. Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency. — URL: https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/ENE_Adopted_02-2009.pdf (дата обращения 09.03.2025).

УДК 628 С247

Алешин Д.А., Захаров С.Л.

Проектирование, изготовление и испытание корпусного аппарата с сальниковыми коробками для жестких полупроницаемых поверхностей цилиндрической формы с учетом динамики процесса в программе SOLIDWORKS 3D CAD.

Алешин Дмитрий Алексеевич – студент, Bulker1@yandex.ru

Захаров Станислав Леонидович – д.т.н., доц., проф. Каф. Инженерного проектирования технологического оборудования

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева», Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В работе рассмотрен вариант проектирования корпусного аппарата с сальниковыми коробками для жестких полупроницаемых поверхностей цилиндрической формы с использованием программы SOLIDWORKS 3D CAD в динамике потоков с учетом температурно-гидродинамических застойных зон.

Ключевые слова: SOLIDWORKS 3D CAD, Solidworks Flow simulation, проектирование 3D, температурно-гидродинамические застойные зоны, сальниковые коробки.

Design, manufacture and testing of a housing apparatus with stuffing boxes for rigid semi-permeable surfaces of cylindrical shape considering the dynamics of the process in the SOLIDWORKS 3D CAD program.

Aleshin D.A., Zakharov S.L.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation.

The paper considers a design option for a casing apparatus with stuffing boxes for rigid semi-permeable surfaces of cylindrical shape using the SOLIDWORKS 3D CAD program for the purpose of further modeling in the Solidworks Flow simulation system in flow dynamics considering temperature-hydrodynamic stagnant zones.

Keywords: SOLIDWORKS 3D CAD, Solidworks Flow simulation, 3D design, temperature-hydrodynamic stagnation zones, stuffing boxes.

Введение

В связи с актуальностью проблемы очистки вод мы рассматриваем конструкцию аппаратов, использующих мембранные (полупроницаемые) поверхности. В зависимости от рода фильтруемого раствора, аппараты могут сильно различаться в строении, поэтому мы предлагаем актуальное решение для бюджетного расчета характеристик мембранных корпусных аппаратов, чтобы снизить расходы на опытно-конструкторские работы.

Целью настоящей работы является представление гидродинамических и температурных потоков в разрабатываемом корпусном аппарате с сальниковыми коробками для жестких полупроницаемых поверхностей цилиндрической формы в программе SOLIDWORKS 3D CAD. Это важно, так как может помочь как при конструировании схожих аппаратов, использующих мембранные технологии, так и при проектировании аналогичных машин.

Экспериментальная часть

Приступая к проектированию высоконапорного аппарата [1-3] в динамике разрабатываемого процесса разделения компонентов в жидкой смеси, мы неизбежно сталкиваемся с вопросом выбора программ проектирования, которые совершенствуются год от года. В частности, программа КОМПАС, которой пользуются в большей степени студенты первого курса с успехом заменяется программой SOLIDWORKS 3D CAD, приемлемой для выявления температурно-гидродинамических застойных зон в проектируемом технологическом оборудовании студентами старших курсов и магистрантами. В этой связи для проектирования нами выбрана система SOLIDWORKS 3D CAD, которая представляется наиболее приемлемой для поставленной задачи проектирования, изготовления и испытания аппарата с сальниковыми уплотнениями для герметизации основного рабочего элемента цилиндрической формы.

Чтобы спроектировать аппарат в системе в системе SOLIDWORKS 3D CAD, разберём все этапы его проектирования, проиллюстрировав их изображением интерфейса программы (рис.1.)

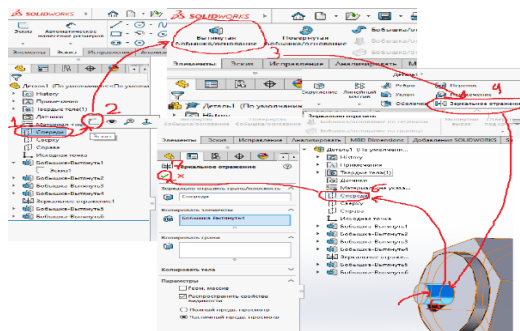


Рисунок 1 - Последовательность выбора инструментов при проектировании в SOLIDWORKS 3D CAD.

Проектирование с целью изготовления корпусного аппарата с сальниковыми коробками для жестких полупроницаемых поверхностей цилиндрической формы с использованием программы SOLIDWORKS 3D CAD в динамике потоков с целью устранения на стадии проектирования температурно-гидродинамических застойных зон начнём с выбора плоскости в системе координат X,Y,Z, в которой создаём эскиз. Полученный эскиз вытягивается в объемную деталь инструментом «Вытянутая бобышка/основание» в системе SOLIDWORKS 3D CAD. Для создания симметричных частей аппарата удобно воспользоваться зеркальным отображением. Зеркальное отображение осуществляется выбором одноимённого инструмента из списка в верхней панели интерфейса вышеупомянутой программы(рис.1). В выпадающем окне выбирается необходимая плоскость симметрии, а также детали, к которым требуется применить зеркальное отображение. После подтверждения все соприкасающиеся детали становятся единым целым, что нужно учитывать как особенность при работе с программой SOLIDWORKS 3D CAD.

Среди прочих инструментов, используемых в SOLIDWORKS 3D CAD, стоит также упомянуть про используемый нами специализированный инструмент для создания нестандартных элементов аппарата, а также резьбы в соответствии с существующими стандартами, выбрать который можно из выпадающего списка при нажатии кнопки создания резьбы в верхней панели интерфейса. Необходимо учитывать, что при создании аппарата в сборке, когда его детали почти касаются друг друга, создание резьбы может быть затруднено в связи с образованием так называемой «нулевой геометрии». Чтобы исправить это, положение резьбы сдвигается на очень малое значение и повторяется попытка построения.

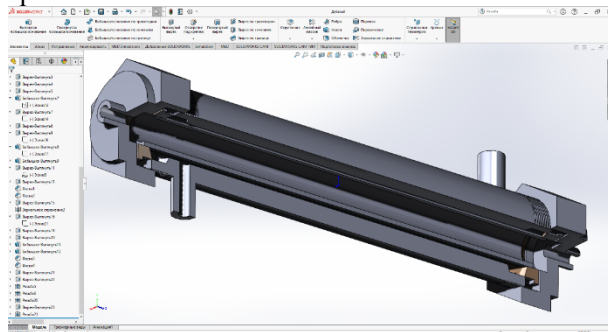


Рисунок 2 - 3D-модель аппарата, полученная в Solidworks Flow simulation.

Полученная модель (рис.2) разработана с учетом гидродинамики и тепловых потоков в системе Solidworks Flow simulation, которая использовалась нами как модуль вычислительной гидродинамики, встроенный в SOLIDWORKS 3D CAD, позволяющий моделировать потоки жидкостей и газов для вычисления рабочих характеристик изделия, в данном случае – для обнаружения температурно-гидродинамических застойных зон [4]. На рис.3 приведены окна выбора, которые последовательно необходимо заполнить при запуске моделирования потоков.

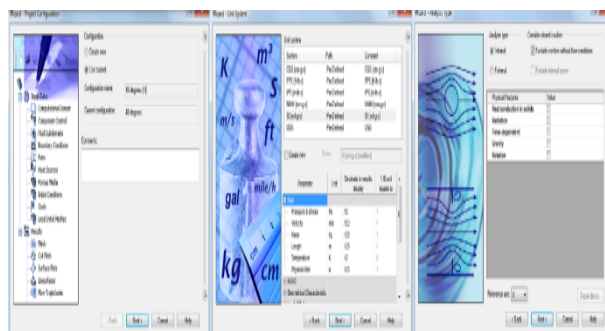


Рисунок 3 - Окна выбора условий проведения симуляции в Solidworks Flow simulation

Для этого выбирается модель и её конфигурация. После этого выбирается система единиц измерения, полость в которой необходимо провести симуляцию, газ или жидкость из большого списка (или задаются собственные характеристики), начальные температура и давление среды. По окончании выбора, откроется окно нового процесса, в котором можно будет запустить симуляцию.

3D-модель аппарата, полученная в *SOLIDWORKS 3D CAD* (рис.2), позволяет осуществить выявление застойных зон в гидродинамических и температурных режимах в этой же системе с использованием подсистемы *Solidworks Flow simulation*, не прибегая к другим системным продуктам, что облегчает процесс и избавляет от возникновения проблем с совместимостью моделей, по сравнению с вариантом последовательного использования системы Компас и *SOLIDWORKS 3D CAD*.

Конечный продукт представлен на рис.4. В соответствии с разработанным чертежом, аппарат представляет собой металлическую трубу, в которую помещают пористый рабочий элемент цилиндрической формы. Герметизация пористой трубки осуществляется с помощью сальникового уплотнения в классическом исполнении. Испытания показали герметичность уплотнительного соединения в несколько десятков атмосфер, что вполне соответствует конструкции аппаратов подобного типа.

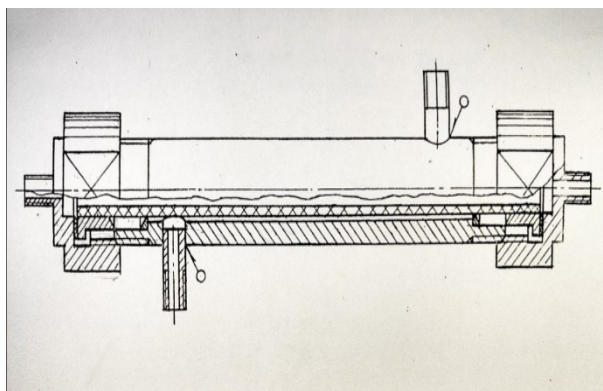


Рисунок 4 - Чертёж аппарата в 2D с учетом выверенных застойных зон.

Полученный чертёж и его объёмные представления (рис.2,4) позволяют осуществить апробирование аппарата в динамическом режиме с выявлением температурных и гидродинамических застойных зон для усовершенствования и модернизации разработанного на первом этапе проектирования изделия без затрат на производство несовершенного аппарата с дальнейшей его затратной доводкой, что немаловажно в своевременной и качественно апробированной сдаче оборудования заказчику.

В представленной работе выявлено, что использование для проектирования корпусного аппарата с сальниковыми коробками для жестких полупроницаемых поверхностей цилиндрической формы подсистемы *Solidworks Flow simulation* программы *SOLIDWORKS 3D CAD* оказалось вполне эффективным.

Иногда при моделировании потоков может возникнуть ошибка, связанная с перекрытием области симуляции и частей аппарата. В случае ошибки симуляции необходимо убедиться, что в исходной модели аппарата нет тел, которые могут перекрывать область потока. В данном случае

необходимо зайти в дерево модели, выделить и удалить лишние тела, после чего повторить попытку моделирования, либо изменить область симуляции.

После внесения модели корпусного аппарата с сальниковыми коробками для жестких полупроницаемых поверхностей, созданной в системе SOLIDWORKS 3D и подбора требуемых характеристик потока, а также концентрации и начальных температур растворов, получаем следующее визуальное представление теплообмена и гидродинамики потоков (рис.5).

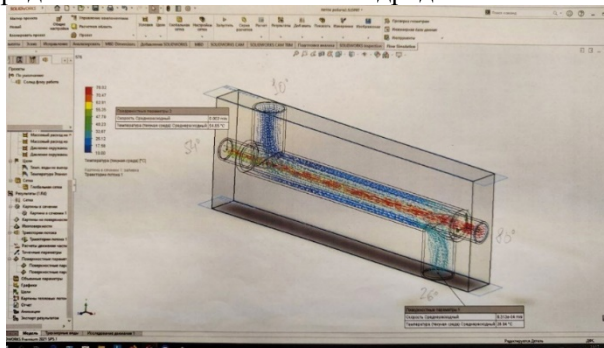


Рисунок 5 - Фрагмент визуализации теплообмена в динамике при использовании модуля Solidworks Flow simulation.

На рис.5 показан фрагмент снижения температуры греющего агента реакционной среды и повышения температуры исходной смеси на примере модели разработанного аппарата в динамике. Так, температура теплоносителя (греющего агента) в результате теплообмена снизилась с 80°C до 54 °С. Рабочая среда, в свою очередь, в условиях противотока разогревается с 10 °С до 26 °С. Также видны все зоны температурно-гидродинамического застоя, что позволяет нам модернизировать аппарат без сборки опытного образца.

Заключение

Таким образом, мы можем подтвердить эффективность использования *подсистемы Solidworks Flow simulation программы SOLIDWORKS 3D CAD* как для решения проблемы поиска температурно-гидродинамических зон застоя, так и для расчета других ключевых характеристик и параметров, необходимых при успешном проектировании и изготовлении корпусного аппарата с сальниковыми коробками для жестких полупроницаемых поверхностей. Полученные результаты демонстрируют значительное сокращение времени проектирования и повышения точности расчетов по сравнению с методом последовательного проектирования и моделирования среды. Предложенный подход может быть распространен и на другие типы аппаратов мембранной очистки.

Список литературы

1. Дытнерский Ю.И., Борисов Г.С. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию. 2-е издание, перераб. и доп. М.: Химия, 1991. -493 с.
2. Свитцов А.А., Григорьев В.С., Федотов А.В. технология мембранной очистки сточных вод с применением адсорбентов // Химия и технология воды. 2018. Т.40, №5. С. 564-572.
3. Каграманов Г.Г., Фарносова Е.Н., Голованева Н.В. Наночелчтрационная очистка воды от солей жесткости // Вода: химия и экология. 2014. №5. С. 36-41.
4. Фиалкова Е.А., Баранов В.И., Слободин А.А. применение программы Solidworks Flow Simulation для описания гидродинамических процессов в вихревом эмульсоре // Международный научный журнал «Вестник науки» №5 (62) Т.4, май 2023, С. 886-89.

УДК 37.022

Артиков А., Усмонов Б.Ш., Шодиева М.И.

Системное мышление в анализе процессов и аппаратов на примере солнечной сушильной установки

Артиков Аскар - д.т.н., профессор кафедры, askarartikovich@gmail.com

Усмонов Батир Шукуриллаевич, - д.т.н., профессор, ректор, txti_rektor@edu.uz

Ташкентский Химико-технологический институт, 700011, Узбекистан, Ташкент, ул. Навои, 32;

Шодиева Махфуза Истамовна - докторант

Бухарский государственный технологический университет,
200117, Узбекистан, Бухара, ул.К.Муртазоева, 15.

В тезисах рассмотрено применение методологии системного мышления, имеющее эффект в преподавании и научных исследованиях предмета процессы и аппараты химической технологии. Показано ее преимущество на примере анализа солнечной сушильной установки, позволяющей исследовать ее по иерархической ступени, разработать методов анализа, моделирования, расчета оптимального процесса и аппарата. Если классические методы расчёта процессов сушки требуют многочасового труда, то компьютерная модель за считанные секунды позволяет получить показатели почти всех параметров солнечной сушильной установки.

Ключевые слова: сушка, процесс, аппарат, моделирование, анализ, системное мышление, солнечной

System thinking in the analysis of processes and equipment by the example of a solar drying plant

Artikov A¹., Usmonov B.S¹., B.Sh., Shodieva M.I²,

¹Tashkent Institute of Chemical Technology, Tashkent, Uzbekistan.

²Bukhara State Technological University,

The thesis discusses the application of systems thinking methodology, which has an impact on teaching and scientific research in the field of processes and apparatuses of chemical technology. Its advantages are demonstrated through the analysis of a solar drying system, allowing for its investigation at hierarchical levels, the development of analysis methods, modeling, and the calculation of optimal processes and apparatus. While classical methods for calculating drying processes require hours of labor, a computer model can provide values for almost all parameters of the solar drying system in just a few seconds..

Key words: analytical chemistry, drying, process, equipment, modeling, analysis, systems thinking, solar energy.

Введение.

Предмет процессы и аппараты отличается требованием анализа - мыслительной деятельности специалиста, основанной на логическом мышлении. Если субстанцию анализа называть объектом, то в большинстве случаев по ходу анализа мы незаметно проникаем внутрь субстанции. Иногда, получаем достаточно удовлетворительный результат, а иногда выявленный результат окажется недостаточно приемлемым, и нужно вновь и вновь возвращаться к рассмотрению данной проблемы. Нами на основе глубокого анализа аппаратов и процессов предложена методология системного мышления. В качестве примера рассмотрены вопросы системного мышления применительно для солнечной сушильной установки, используемой для сушки сельскохозяйственной продукции.

В целом, системное мышление в анализе **процессов и аппаратов химической технологии**, выполняется в следующей последовательности, а именно по методу, предложенному в [1].

Первый этап (системное мышление и анализ).

- Предварительно изучается выбранный объект, в рассматриваемом случае - солнечная сушильная установка, используемая для сушки материала, включающая технологический элемент (это система) и процесс сушки. Формируются требования к системе, процессу сушки и энергии в системе.

- Определяются входные и выходные параметры, как системы, так и исследуемого процесса сушки.

- уточняется иерархические ступени аппарата, который разделяется на составляющие элементы-квазиаппараты: определяются входные и выходные параметры процессов каждого квазиаппарата

Второй этап (Определение взаимосвязи параметров).

Определение взаимосвязи параметров солнечной установки для сушки продукции требует углубления исследований в саму систему, и тогда определяются математические и компьютерные модели.

Третий этап (Выбор оптимального решения).

На этой стадии уточняются и конкретизируются требования к солнечной установке для сушки продукции на основе системного анализа. Выбираются критерии оптимизации, как для всей системы установки, так и для подсистем каждой ее иерархической ступени. Выбирается способ поиска оптимального решения. Определяется оптимальное решение.

На основе методологии системного мышления разработана методика математического и компьютерного моделирования процессов в солнечной установке для сушки продукции. Это включает математические модели выбранных под-процессов в каждом квазиаппарате, в том числе, первоначально составленной компьютерной модели изменения температуры материала, изменения передачи тепловой энергии, изменения равновесного состояния между твердой и газовой фазой и изменения массы испаряющейся воды за счёт массопереноса. Далее блочным принципом, последовательно объединяя блоки компьютерных моделей, составлена общая компьютерная модель. Путём экспериментов на компьютерной и физической модели осуществлена коррекция, согласованность компьютерной модели с коррекцией по коэффициенту массоотдачи и коэффициенту теплоотдачи, а также равновесной температуре для оптимального изменения массы. Получены кривые изменения влажности материала, температуры материала, равновесной температуры для материала, изменения массы высушиваемого материала, изменения количества воды, переходящей в газовую фазу и изменения работы, выполняемой для сушки материала. На основе этого можно рекомендовать ряд способов оптимизации устройства и работы солнечной сушильной установки и автоматизации всего процесса сушки продукции.

В последнее время в области сушки сельскохозяйственной продукции увеличивается использование нетрадиционных источников энергии, в частности солнечной энергии. Однако, в большинстве стран, все еще широко практикуется открытая сушка на Солнце, где продукты сушатся на земле, на бетоне и даже на дорогах под прямыми солнечными лучами, при этом продукты загрязняются пылью, насекомыми и страдают от грызунов, птиц и животных [2]. Кроме того, такая сушка при неблагоприятных климатических условиях приводит к потере количества и к ухудшению качества конечного продукта [3,4]. В некоторые годы общие потери продукции после сбора урожая составляют 20-50% [3], и почти 10-40% урожая никогда не доходят до конечных потребителей из-за потерь продукта [6]. Во многих случаях сушильная установка, работающая на солнечной энергии, является разумной альтернативой. Преимущество солнечных установок для сушки продукции [7-9] заключается в низких инвестиционных затратах по сравнению с высокотехнологичными сушилками, работающими от традиционных источников энергии. Для различных сельскохозяйственных продуктов разработаны варианты солнечных сушильных установок, такие как тепличная сушилка [8-10] и гибридная солнечная сушилка [11,12].

Многочисленные типы солнечной сушки и системы интенсивны, эффективны и гигиеничны по сравнению с традиционным методом сушки на солнце на открытом воздухе. В процессе солнечной сушки влага из сельскохозяйственных продуктов удаляется за счет влагоемкости воздуха, а также теплопередачей, конвекцией и излучением. Солнечное излучение проходит через прозрачный лист и сохраняется в виде тепла в сушильной камере или солнечном коллекторе при температуре 30–60°C. Затем тепловая энергия воздухом передается сушильной камере.

В солнечной сушильной установке воздух подается в воздушнонагревательную камеру, которая нагревается от солнечного коллектора. Наверху установлен вход для материала, с которого материал подается на ленточный конвейер. Нагретый воздух проходит вверх через слои высушиваемого материала на ленточном конвейере. Встречное передвижение теплого воздуха обеспечивает последовательную сушку материала, поток теплого воздуха поднимается вверх к вытяжной трубе. Готовый продукт выводится из камеры сушки.

Солнечная сушильная установка позволяет интенсифицировать технологический процесс сушки сырья в мягких режимах без воздействия прямых лучей Солнца.

Экспериментальная часть

На основе методологии системного мышления [1,16] развиты методы многоступенчатого моделирования процесса и поиска оптимальных решений конструкции и работы солнечной установки для сушки сельскохозяйственной продукции.

На основе системного мышления и многоступенчатого анализа определена последовательность и взаимосвязь изменения параметров солнечной установки для сушки продукции [1].

Иерархические ступени солнечной сушильной установки. Использование метода системного мышления в многоступенчатом анализе солнечной сушильной установки дает возможность рассмотреть глубинные явления в ней. С этой целью разработана методика математического и компьютерного моделирования на основе составленных математических моделей процессов в каждом квазиаппарате.

В первом иерархическом уровне рассматривается сама солнечная сушильная установка, в виде системы с процессом сушки материала в ней, определяются входные и выходные параметры системы. В качестве входных параметров определены начальная температура сырья, влажность сырья, масса сырья высушиваемых материалов, размеры частиц, мощность подаваемой энергии, влажность воздуха, расход воздуха, температура воздуха влажность материала,. Выходные параметры - температура материала, масса высушенного материала, количество переходящей влаги в газовую фазу, потребляемая энергии для сушки материала.

Во второй иерархической ступени в солнечной сушильной установке рассматриваются аппараты нагрева воздуха с солнечным коллектором, сушильной камеры и воздухоотвода; элементы входа и выхода материала. Определяются показатели – входные и выходные параметры каждой подсистемы.

В третьей иерархической ступени рассмотрен аппарат сушки материала нагретым солнечной энергией воздухом, который разделяется на квазиаппараты: это корпус аппарата сушки нагретым воздухом, включая многосекционный ленточный конвейер, высушиваемый материала и систему подачи горячего воздуха. Определяются входные и выходные параметры каждой подсистемы - квазиаппарата.

В четвертой иерархической ступени высушиваемый материал разделён на элементы - квазиаппараты, это кусочки или части высушиваемых материалов. Определяются показатели – входные и выходные параметры каждой подсистемы.

В пятой иерархической ступени кусочки или части высушиваемого материала состоят из квазислоёв.

В шестой иерархической ступени каждый такой квазислой (кусочки или части высушиваемых материалов) можно представить состоящим из макромолекул и т.д.

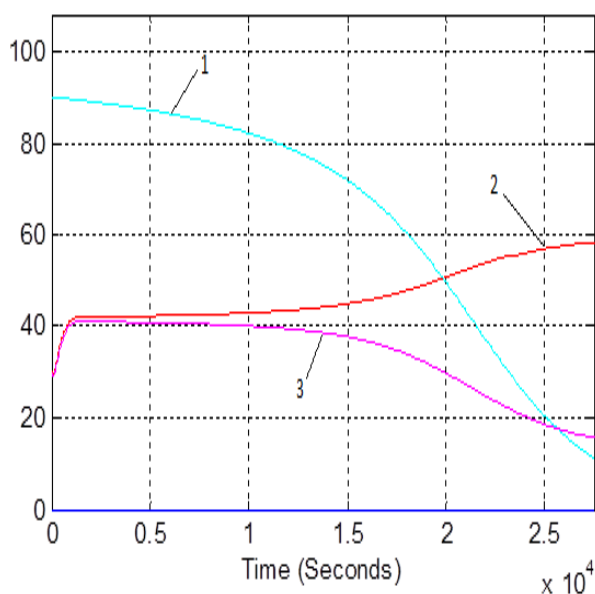


Рисунок 1 - Результаты экспериментов на построенной компьютерной модели процесса сушки на солнечной сушильной установке по изменению во времени основных параметров сушки продукции: влажности (1 - голубая линия), температуры (2 -красная линия) и равновесной температуры высушиваемого материала (3 – фиолетовая линия).

На основе методологии системного мышления разработана методика математического, компьютерного моделирования и расчета процессов в солнечной сушильной установке. Она включает математические модели процессов в каждом квазиаппарате, в частности, первоначально составленной компьютерной модели изменения температуры материала, изменения передачи тепловой энергии, изменения равновесного состояния между твердой и газовой фазой и изменения массы испаряющейся воды за счёт массопереноса. Блочным принципом последовательного объединения блоков компьютерных моделей позволило составить общую компьютерную модель. Путём экспериментов на компьютерной и физической модели осуществлена коррекция, согласованность компьютерной модели.

Обычные расчёты процессов сушки классическими методами требуют несколько часов упорного труда. Компьютерная модель за считанные секунды позволяет получить кривые изменения влажности материала, температуры материала, равновесной температуры, изменения массы высушиваемого материала, изменения количества переходящей воды в газовую фазу, изменения энергии, затраченной для сушки материала. Далее можно переходить оптимизации солнечной сушильной установки и автоматизации всего процесса. В частности, на рис.1.проведены эксперименты на построенной компьютерной модели солнечной сушильной установки, примененной для сушки материала. Рассчитаны и рассмотрены все параметры солнечной сушильной установки, в частности на рисунке показаны изменения основных параметров по времени сушки: влажности (1 - голубая линия), температуры (2 -красная линия) и равновесной температуры высушиваемого материала (3 – фиолетовая линия). Результаты позволяют определить оптимальные условия процессов сушки в солнечной сушильной установке.

Заключение

Методология системного мышления позволяет более глубоко анализировать процессы и аппараты химической технологии, рассмотреть глубинные явления и процессы в ней. Это показано на примере расчета солнечной сушильной установки. Анализом на первом уровне рассматривается сама установка, во втором уровне - аппараты нагрева воздуха, рабочей зоны сушильной установки, вывода готового продукта и трубы вывода воздуха, в третьем уровне - корпус аппарата, ленточный конвейер, высушиваемый материал и горячий воздух, в четвертом уровне - кусочки или части материала, в пятом уровне - квазислой частичек, а в шестом - макромолекулы. Блочным принципом, последовательно объединяя блоки компьютерных моделей, составлена общая компьютерная модель. На компьютере установлены кривые изменения влажности материала, температура материала, его равновесная температура, определяются масса высушиваемого материала, количество переходящей воды в газовую фазу, энергия для сушки материала и другие. Это позволяет рекомендовать ряд способов оптимизации, повышать качество готовой продукции и интенсифицировать технологический процесс сушки сельскохозяйственной продукции.

Список литературы

1. А. Артиков. Системное мышление в процессе создания и управления инженерными технологиями. Учебное пособие. Под редакцией Ю. Н.Абдуллаева. Ташкент – 2023.216 стр.
2. Belessiotis V., Delyannis E. Solar drying. *Solar Energy*, 2011, vol. 85, pp. 1665-1691.
3. Shaopeng G., Qibin L., Jie S., Hongguang J. A review on the utilization of hybrid renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 91, pp. 1121-1147.
4. Sivasundar S., Selvam K., Saravanan D. Experimental analysis of a natural convection solar dryer with a reflector. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2018, vol. 9, pp. 28-31.
5. Venkataraman V., Iniyan S., Goic R. A review of solar drying technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, vol. 16, pp. 2652-2670.
6. Parmar M.R., Bhalodiya V.B., Rajput R.L. Retention of Active Ingredients in Solar Drying. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2018, vol. 7, pp. 2822-2831.
7. Wei C., Man Q. Analysis of the heat transfer and airflow in solar chimney drying system with porous absorber. *Renewable Energy*, 2014, vol. 63, pp. 511-518.
8. Ed B.F., Mujumdar A. Solar drying in agriculture. *Drying Technology*, 1991, vol. 9, pp. 1125-1126.

9. Sandali M., Boubekri A., Mennouche D., Gherraf N. Improvement of a direct solar dryer performance using a geothermal water heat exchanger as supplementary energetic supply. An experimental investigation and simulation study. *Renewable Energy*, 2019, vol. 135, pp. 186-196.
10. Ruiz C.M., Rodriguez G.M., Acevedo-Suárez J. Solar drying and agribusiness. *American Journal of Engineering Research*, 2016, pp. 142-145.
11. Devan, P.K., Chidambaranathan B., Shabrin I., Gokulnath R., Karthick D. Solar drying of fruits – A comprehensive review. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 33, pp. 167-174.
12. Yahya M., Fudholi A., Sopian K. Energy and exergy analyses of solar-assisted fluidized bed drying integrated with biomass furnace. *Renewable Energy*, 2017, vol. 105, pp. 22-29.
13. Artikov A., Narziev M., Savriev Y., Buronov S., Haydarova N. Intellectual determination of the coefficient of oil extraction in the semi-industrial installation of oil-containing material pressing. *Journal of Critical Reviews*, 2020, no. 7. Available at: <http://www.jcreview.com/mno=116758>. (Accessed 29.01.2021).
14. Артиков А.А., Машарипова З.А. Расчет процесса сушки материалов растительного происхождения на основе сорбционно - испарительных свойств. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 2016, no. 4, пп. 39-43.
15. Машарипова З.А. *Моделирования технологического процесса эффективной сушки материала растительного происхождения и совершенствование аппарата. Дисс. докт. фил.* Ташкент, 2018, 44 п.
16. А.Артиков. Введение в системное мышление. (Тизимли тахлилга кириш). Свидетельство о депонировании объектов авторского права № 000300. Агентство по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан. 10.11.2016.

УДК 544.47

Атласкина М.Е., Смородин К.А., Крючков С.С., Маркин З.А. Воротынцев И.В.

Каталитическое превращение CO₂ в ценные продукты – циклические карбонаты

Атласкина Мария Евгеньевна – к.т.н., старший научный сотрудник; atlaskina.m.ev@muctr.ru

Смородин Кирилл Александрович – младший научный сотрудник;

Крючков Сергей Сергеевич – младший научный сотрудник;

Воротынцев Илья Владимирович – д.т.н., профессор, профессор кафедры;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

Маркин Захар Алексеевич – студент;

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», Россия, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23.

В тезисах рассмотрен спектральный скрининг протекания реакции карбоксилирования эпихлоргидрина, разработан экспериментально-аналитический комплекс для исследований in-situ/operando на основе ИК спектроскопии с использованием иммерсионных ИК-зондов, работающих при высоком давлении и температуре.

Ключевые слова: конверсия CO₂, катализ, ИК-спектроскопия, ионная жидкость

Catalytic conversion of CO₂ into valuable products - cyclic carbonates

Атласкина М.Е.¹, Смородин К.А.¹, Крючков С.С.¹, Маркин З.А.², Воротынцев И.В.¹

¹ D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

² Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation

The theses discusses spectral screening of epichlorohydrin carboxylation reaction, and an experimental and analytical system for in-situ/operando studies based on IR spectroscopy using immersion IR probes operating at high pressure and temperature has been developed.

Key words: CO₂ conversion, catalysis, IR spectroscopy, ionic liquid.

Введение

Углекислый газ (CO₂) является парниковым газом, и его растущая концентрация в атмосфере нарушает терморегуляцию планеты, что делает его основной причиной глобального изменения климата. Поиск и разработка технологий утилизации CO₂ является важнейшей задачей науки и техники. Из-за высокой термодинамической и кинетической стабильности CO₂ утилизация является весьма нетривиальной задачей. В этой связи особую роль играют каталитические процессы.

На сегодняшний день одним из наиболее перспективных путей снижения выбросов углекислого газа является его переработка (конверсия) в циклические карбонаты. Помимо экологичности и высокой энергоэффективности, процесс привлекателен возможностью получения полезных химических веществ. Циклокарбонаты (ЦК) используются в качестве растворителей, компонентов аккумуляторов. Синтез ЦК путем циклоприсоединения CO₂ к эпоксидам более перспективен по сравнению, например, с традиционным подходом получения ЦК с использованием фосгена из-за его токсичности и побочных продуктов. Привлекательным субстратом является 2(хлорметил)оксиран (эпихлоргидрин), который можно получить из возобновляемого ресурса, глицерина, кроме того, его превращение в ЦК происходит легче, чем в случае других эпоксидов из-за высокой электроотрицательности атома хлора.

Процесс конверсии диоксида углерода, изучаемый в данной работе, происходит в присутствии катализатора. В качестве катализаторов используются цеолитные имидазолатные каркасы (ZIF), комплексы алюминия, металлоорганические каркасы (MOF), органокатализаторы, такие как триэтанолламин. Явными лидерами среди всех катализаторов являются ионные жидкости (ИЖ) благодаря их низкой летучести, экологичности, способности заметно повышать эффективность и селективность химической реакции, а также разнообразию структур. В настоящее время многие работы по данной тематике сосредоточены на DFT-описании механизма реакции, которое дает лишь приблизительные результаты [1,2]. Теоретическая модель требует подтверждения экспериментом.

В настоящей работе представлен и обоснован механизм реакции карбоксилирования ненасыщенных сложных оксидов эпихлоргидрином в присутствии катализатора 1-(2-гидроксиэтил)-3-метилимидазолия бромида. В рамках исследования разработан экспериментально-аналитический комплекс для исследований in-situ/operando на основе ИК-Фурье спектроскопии с иммерсионными зондами. Комплекс предназначен для изучения реакции карбоксилирования ненасыщенных

соединений при атмосферном или повышенном давлении в замкнутом объеме. На основе данных ИК-Фурье спектроскопии *in-situ / operando* предложен механизм исследуемой реакции. Показано, что координация субстрата к катализатору происходит за счет возникновения водородных связей между имидазольным протоном в положении С² имидазольного кольца и гидроксильной группой заместителя в ИЖ.

Экспериментальная часть

В настоящей работе был проведен синтез и исследование каталитических свойств ионной жидкости 1-(2-гидроксиэтил)-3-метилимидазолия бромид $[\text{C}_2\text{OHmim}][\text{Br}]$, которая продемонстрировала высокую степень превращения ЭХГ и селективность без использования какого-либо растворителя или сокатализатора.

Исследовано влияние температуры, давления и концентрации катализатора на реакцию карбоксилирования эпихлоргидрина. $[\text{C}_2\text{OHmim}][\text{Br}]$ показала хорошую каталитическую активность как при однократном, так и при повторном использовании. После 5-го использования катализатора конверсия эпихлоргидрина снизилась менее чем на 10% – с 84% до 76%. С целью интенсификации процесса было исследовано влияние ультразвукового и микроволнового излучения на скорость протекания реакции. Облучение значительно ускорило реакцию карбоксилирования эпихлоргидрина, но несколько снизило селективность по основному продукту. Ультразвуковое воздействие оказалось наиболее эффективным методом, по сравнению с микроволновым (удалось достичь конверсии эпихлоргидрина 83% за 4 часа). Хотя без облучения та же конверсия была достигнута только через 10 часов.

Разработан экспериментально-аналитический комплекс для *in-situ/operando* исследований на основе спектроскопии с погружными зондами, работающими при высоком давлении и температуре, который использован для спектрального скрининга и анализа хода реакции карбоксилирования эпихлоргидрина. Экспериментальная установка, предназначенная для проведения реакции карбоксилирования непредельных оксидов при повышенном давлении в замкнутом пространстве, представлена на рисунке 1. Установка состоит из реактора (1), изготовленного из нержавеющей стали 08Х16Н11М3, имеющего одно технологическое отверстие для входа и выхода газа и содержащего катализатор - $[\text{C}_2\text{OHmim}][\text{Br}]$ и исходное вещество - эпихлоргидрин, а также оснащен необходимой контрольно-измерительной аппаратурой.

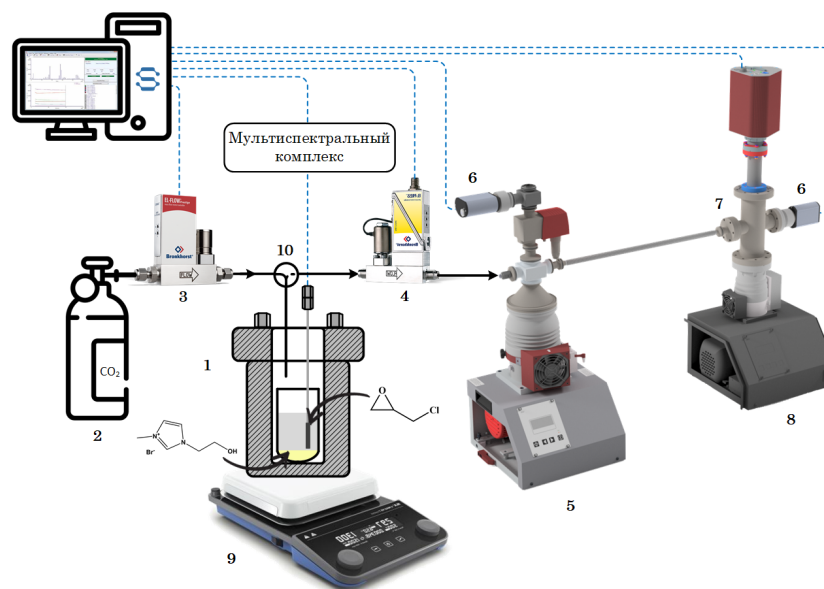


Рисунок 1 - Принципиальная схема экспериментальной установки для изучения концентрационных профилей реакции, протекающей при повышенном давлении в атмосфере углекислого газа в ограниченном объеме

Для переключения между режимами работы реактора (впуск газа, анализ газа) используется трехпортовый двухпозиционный клапан SS-83XTS4 (2) (Swagelok, США). В данной системе в начале эксперимента во внутренний объем реактора вводится углекислый газ, а затем, через определенное время, трехпортовый клапан переключается в положение, соединяющее реактор с масс-

спектрометрическим комплексом для анализа состава газовой среды. Дополнительно реактор оснащен зондами, которые используются для мониторинга процесса реакции. Контроль осуществлялся спектрометрически с помощью мультиспектрального комплекса с помощью ИК и Рамановских зондов, погруженных в реакционную смесь (жидкую фазу). В такой системе газ диоксид углерода подается из баллона (3) через регулятор давления 072S-0050C-1S-5 (Drastar LTD, Корея) и регулятор расхода газа (4) El-Flow Prestige FG-201CV (Bronkhorst, Нидерланды). На выходе из реактора установлен регулятор давления газа (5), работающий в режиме поддержания постоянного давления «до себя», El-Press P-702CM (Bronkhorst, Нидерланды). Выход из реактора подключен к масс-спектрометрическому комплексу (6), состоящему из мембранного и турбомолекулярного вакуумных насосов (Pfeiffer Hi-Cube ECO 300), которые обеспечивают первичное разряжение в зоне ввода пробы. Давление в этой полости определяется с помощью датчика давления (7) (Pfeiffer MPT200). Далее вакуумный пост соединен с камерой масс-спектрометра (8) (Pfeiffer PrismaPro QMG 250 M2), где вакуум обеспечивается вторым вакуумным постом (9) (Pfeiffer Hi-Cube 80 Eco), а его уровень определяется вторым датчиком давления той же модели. Сам реактор расположен на управляемой магнитной мешалке C-Mag HS 7 (10) (IKA-Werke, Германия) для постоянного перемешивания реакционной смеси.

Для изучения механизма реакции проводился мониторинг реакции *in-situ/ operando* с помощью ИК-Фурье спектроскопии. Для мониторинга зонды погружали непосредственно в реакционную смесь, начальное давление составляло 650 кПа (снижалось по мере протекания реакции), а температура реакции поддерживалась постоянной на уровне 90 °С. Концентрация катализатора составляла 2 моль%. Сканирование проводилось через фиксированные промежутки времени: более короткие (5-10 минут) в начале реакции и увеличивающиеся по мере увеличения конверсии (30-60 минут), когда реакция замедляется из-за уменьшения концентрации реагентов по мере их расходования. (ИК спектры представлены на рисунке 2).

Область 1000-700 см^{-1} ИК-спектра показана на рисунке 2 (а). Здесь присутствуют в основном скелетные валентные и деформационные колебания связей С-С, а также колебания углерод-галоген (в нашем случае - С-Cl). Из спектра видно, что колебания, относящиеся к исходному эпихлоргидрину, уменьшаются, а к продукту - увеличиваются. Также появление новых колебаний свидетельствует не о новых связях С-С, а о новых модах колебаний, которые стали доступны в более лабильном пятичленном хлорпропиленкарбонатовом цикле.

Полосы поглощения колебаний связи С-О-С карбонатного фрагмента растут почти так же интенсивно, как и пик связи С=О. Поскольку таких связей в образовавшемся карбонате несколько, и они неэквивалентны, в спектре можно наблюдать несколько возрастающих полос (рис. 2, б). Полосы С-О-С связей хлорпропиленкарбоната находятся при 1158, 1061 и 1037 см^{-1} . Также видны полосы С-О-С исходного эпихлоргидрина: небольшие пики при 1137 и 1089 см^{-1} . Видно, что эти пики гораздо менее интенсивны, чем в хлорпропиленкарбонате: из-за напряженности кольца (трехчленный цикл эпихлоргидрина) колебания связей в нем имеют меньшие амплитуды.

В области 1500 – 1200 см^{-1} (рис.2, в) в основном наблюдаются деформационные связи С-Н. По мере накопления продукта начинают появляться новые полосы, соответствующие этим колебаниям, хотя в хлорпропиленкарбонате новых связей С-Н не появляется по сравнению с исходным эпихлоргидрином. Это также связано с более напряженной геометрией трехчленного цикла исходного соединения по сравнению с продуктом и ограничением его колебательных мод и интенсивностей, что также видно по спектру: некоторые полосы колебаний связей С-Н в продукте более интенсивны по сравнению с исходным соединением.

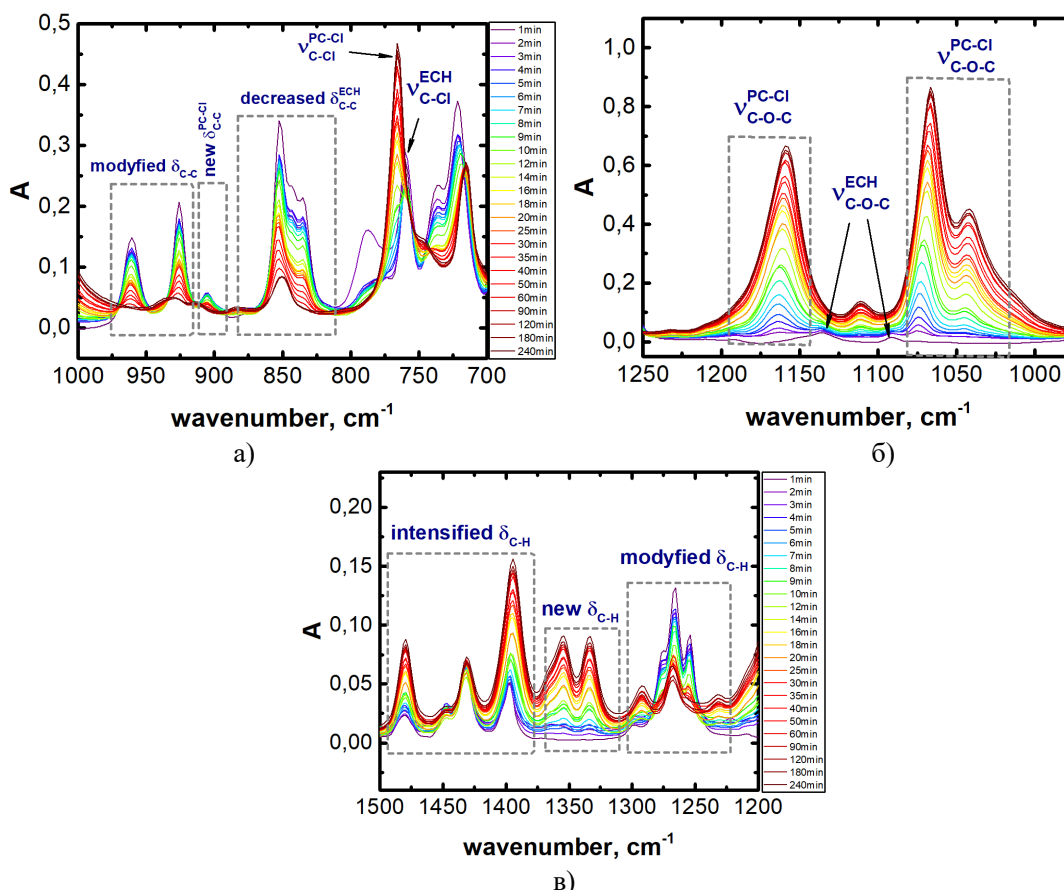


Рисунок 2 - ИК-спектры реакционной смеси в реакции карбоксилирования эпихлоргидрина:
 а – область 1000-700 см^{-1} ; б – область 1250-950 см^{-1} ; в – область 1500 – 1200 см^{-1}

Методом ИК-спектроскопии показана координация субстрата на катализаторе, которая происходит за счет возникновения водородных связей между имидазольным протоном в положении C^2 имидазольного кольца и гидроксильной группой заместителя в ионной жидкости. На основании полученных данных предложен механизм каталитической реакции (рис.3). Вначале происходит координация эпоксида на катализаторе. Этому способствует образование водородной связи между кислородом хлорпропиленкарбоната и водородом катализатора: кислым протоном имидазольного кольца и водородом гидроксильной группы 2-этокси заместителя имидазольного кольца. Координация происходит по обоим путям, как было доказано спектрально выше, что также согласуется с концепцией, согласно которой ИЖ с гидроксильной группой в составе проявляют более высокую каталитическую активность. Координация протона кислоты с атомом кислорода эпоксида приводит к поляризации связи C-O , что облегчает раскрытие эпоксидного кольца, и одновременно происходит нуклеофильная атака галогенидного аниона Br^- по менее затрудненному β -атому углерода эпоксида (стадия I). Далее эпоксид раскрывается и происходит перенос протона с гидроксильной группы ИЛ на кислород раскрытого хлорпропиленоксидного цикла, образуя промежуточный переходный 7-членный цикл, включающий фрагмент ИЛ и кислород субстрата (стадия II). Затем молекула CO_2 координируется в систему: кислород оксида притягивает углерод CO_2 с дефицитом электронной плотности, и происходит обратный перенос протона на гидроксильную группу ИЛ (стадия III). Между углеродом CO_2 и кислородом хлорпропиленоксида образуется связь C-O . В то же время кислород, координированный с протонами ИЖ, имеет избыточную электронную плотность и атакует обедненный электронами углерод хлорпропиленоксида, связанный с легко уходящим атомом брома (стадия IV). Далее карбонатный цикл замыкается - образуется продукт - и происходит регенерация ИЖ (стадия V).

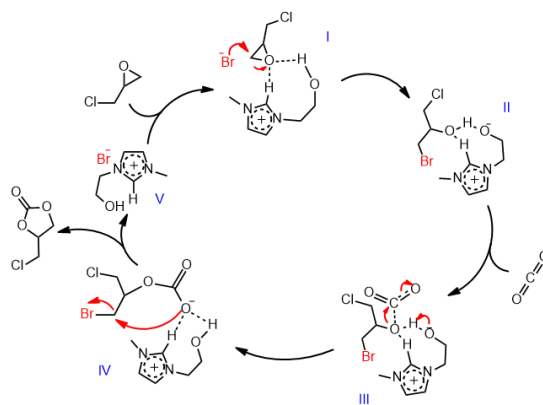


Рисунок 3 - Предполагаемый механизм реакции карбоксилирования эпихлоргидрина с катализатором $[C_2OHmim][Br]$

Заключение

Для спектрального скрининга и анализа протекания реакции карбоксилирования эпихлоргидрина разработан экспериментально-аналитический комплекс для исследований in-situ/operando на основе ИК спектроскопии с использованием иммерсионных ИК- зондов, работающих при высоком давлении и температуре. ИК-спектроскопия также показала координацию субстрата на катализаторе, которая происходит за счет возникновения водородных связей между имидазольным протоном в положении C² имидазольного кольца и гидроксильной группой заместителя в ИЛ. Проведенные исследования подтвердили предложенный механизм каталитической реакции превращения диоксида углерода в циклические карбонаты. Показано, что ионные жидкости такого типа с гидроксильной группой в составе проявляют высокую каталитическую активность.

Выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-79-10302

Список литературы

1. Reaction Mechanism of CO₂ and Styrene Oxide Catalyzed by Ionic Liquids: A Combined DFT Calculation and Experimental Study / Zha J. et al. // Journal of Physical Chemistry A. American Chemical Society. – 2020. – Vol. 124. – № 39. – P. 7991–7998.
2. Highly active aluminium catalysts for the formation of organic carbonates from CO₂ and Oxiranes / Whiteoak C.J. et al. // Chemistry - A European Journal. – 2014. – Vol. 20. – № 8. – P. 2264–2275.

УДК 66.011

Бахаева Д.Д., Капранова А.Б., Воронцов А.А., Егоров В.С.

Стохастический анализ смешения зернистых компонентов в аппарате непрерывного действия

Бахаева Дарья Дмитриевна – старший преподаватель кафедры;

Капранова Анна Борисовна – д.ф.-м.н., проф., заведующий кафедрой; kapranova_anna@mail.ru.

Воронцов Артем Андреевич – аспирант;

Егоров Владимир Сергеевич – аспирант;

ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,

Россия, Ярославль, 150023, просп. Московский, дом 88.

В тезисах приведены результаты моделирования распределения зернистых частиц компонентов сыпучей шихты по углу выброса из блока «барабан-лопасти» аппарата непрерывного действия с учетом характера движения гибких лопастей в непрерывном режиме при заданных множествах конструктивных и режимных параметров.

Ключевые слова: аппарат, смешение, шихта, модель, параметры, функция распределения.

Stochastic Analysis of Mixing Granular Components in a Continuous-Action Apparatus

Bakhaeva D.D., Kapranova A.B., Vorontsov A.A., Egorov V.S.

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

The abstract presents the results of modeling the distribution of granular particles of bulk charge components by the angle of ejection from the drum-blade unit of a continuous-action apparatus, taking into account the nature of the movement of flexible blades in continuous mode for given sets of design and operating parameters.

Key words: apparatus, mixing, batch, model, parameters, distribution function.

Введение

Трудоемкое производство качественной стекольной продукции [1] осуществляется с помощью ряда последовательных технологических процессов, соответствующих основным этапам: подготовке химически однородной сыпучей шихты (смеси компонентов), ее доставке с сохранением однородной структуры, получению стекла и др. Каждый из этих этапов включает несколько вспомогательных технологических операций, в том числе сортировку, дробление, фильтрование, дозирование и смешение ингредиентов, складирование/транспортирование готовой сыпучей шихты, ее плавление, охлаждение, формование, обработку в печи (отжиг) с последующими контрольными мероприятиями и т.д. Состав компонентов шихты зависит от типа стекольного изделия (например, в отношении: устойчивости к температурным/шумовым перепадам; способности к растворению/не растворению в активной среде/воде; степени хрупкости, твердости, прозрачности и т.д.), имеет множество добавок в виде красителей/глушителей цвета, ускорителей для снижения варочной температуры и др. В процентном соотношении основными компонентами шихты обычно выступают кварцевый песок, кальцинированная сода, доломит, каолин и др., т.е. такое сырье, которое служит источником различного рода оксидов. Процесс смешения компонентов шихты в указанной технологической цепи зависит от эффективности выполнения предыдущих операций при регламенте гранулометрического/химического состава сырья и режимов дозирования/перемешивания, а также особенностей конструктивного исполнения смесительного оборудования. Отклонение от заданной степени однородности сыпучей шихты негативно отражается на структуре расплава и является причиной браковки изделий в 60 % случаев. Заметим, что при последующем нагревании неоднородного по составу расплава наблюдаются: снижение плотности получаемой стекломассы, колебательный характер смещений границ системы «сыпучая смесь – образующаяся пена» и пр.

Известны технологии подготовки шихты не только в виде сухой сыпучей смеси, но и в форме суспензий, гелей, однако при использовании последних наблюдается пониженная производительность стеклопроизводства. Традиционно применяемые для смешения стекольных сыпучих шихт аппараты, (например, барабанного и лопастного типов с противоточным характером движения компонентов в циклическом/непрерывном режиме) требуют совершенствования/модернизации вследствие задач импортозамещения и реализации технологий получения новых стеклоизделий с прогнозируемыми свойствами.

Реализация принципа системно-структурного подхода [2, 3] при подготовке инженерного проекта смесительного аппарата для получения сыпучей шихты осуществляется с помощью установления

причинно-следственных связей между информационными переменными процесса смешения компонентов смеси и условиями достижения ее регламентного качества, в том числе при формировании теоретических основ данной технологической операции.

Цель настоящей работы – стохастический анализ процесса получения сыпучей шихты на примере непрерывного смешения ее основных компонентов в лопастном аппарате [4]. К решению предложены следующие задачи: 1) выбор конструктивных и режимных параметров блока «барабан-лопасти»; 2) описание распределения зернистых частиц компонентов сыпучей шихты по углу выброса из блока «барабан-лопасти» с учетом характера движения гибких лопастей в непрерывном режиме.

Выбор параметров процесса смешения компонентов сыпучей шихты

Предложенная конструкция смесителя согласно [4] (рис. 1) предполагает поэтапное смешение ингредиентов сыпучей шихты в образующихся конических потоках: при выбросе из блока «барабан-лопасти» в рабочую зону аппарата частиц ключевого ($i = 1$) и транспортирующего ($i = 2$) компонентов, одновременно поступающих из дозаторов 1 в зазор между элементами блока (барабаном 3 с гибкими лопастями 5 и направляющей поверхностью 2, этап I); при ударе о гофре-отбойник 6 выброшенных из блока «барабан-лопасти» зернистого сырья (этап II).

Конструктивная особенность блока «барабан-лопасти» состоит в расположении гибких лопастей 5 на барабане 3 в виде чередующихся рядов (общим числом n_r) с основным и встречным направлениями движения лопастей 5 в указанном зазоре (рис. 1). После загрузки компонентов ($i = 1, 2$) в дозаторы 1 происходит их спуск вдоль направляющей поверхности 2 в зазор между барабаном 3 с гибкими лопастями 5, которые вращаются относительно центральной оси барабана 3 с угловой скоростью ω . Выброс конических потоков ($i = 1, 2$) из зазора «барабан-направляющая» приводит к их ударному взаимодействию с гофре-отбойником 6 и образованию новых – конических отраженных. Заметим, что число n_b соответствует числу гибких лопастей 5 для каждого ряда. Установка лопастей 5 в чередующихся рядах проводится в противоположных направлениях в касательных плоскостях к барабану-цилиндру 3 для обеспечения основного и встречного направлений движения лопастей в зазоре. Общее число рядов n_r является четным и соответствует парам указанных направлений движения лопастей.

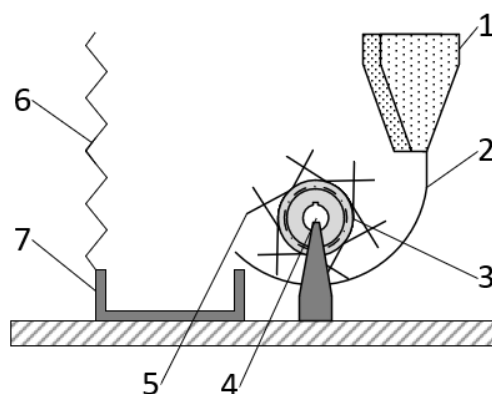


Рисунок 1 - Условная схема аппарата непрерывного действия [4]: 1 – дозаторы; 2 – направляющая поверхность; 3 – барабан; 4 – приводной вал; 5 – гибкие лопасти; 6 – гофре-отбойник; 7 – выгрузное устройство

Пусть барабан-цилиндр 3 имеет радиус r_c , длину L ; лопасти 5 – длину l , ширину h , высоту η ; направляющая поверхность 2 – радиус кривизны профиля R и центральный угол β для дуги на участке от минимальной высоты зазора h_0 между барабаном 3 и поверхностью 2 до обрыва этой поверхности; эксцентриситет ϵ для поверхностей направляющей 2 и барабана-цилиндра 3 на указанном участке. Справедлива формула: $h_0 = R - (r + \epsilon)$.

Далее остановимся на стохастическом моделировании процесса образования конических потоков при смешении зернистого сырья шихты на этапе I, для которого информационные переменные образуют множество U_1 из следующих подмножеств параметров: конструктивных W_1 , режимных W_2 , входных u_1 , выходных u_2

$$U_1 \equiv \{W_{1k} = \text{const}, W_{2l} = \text{const}, u_1(t), u_2(t), \}, \quad (1)$$

где согласно рис. 1 вводится описание геометрии блока «барабан-лопасти» и режимов его работы с помощью подмножеств

$$W_{1k} \equiv \{r_c, L, l, h, \eta, R, \beta, n_r, n_B\}, \quad k = \overline{1, s_1}, \quad (2)$$

$$W_{2l} \equiv \{\omega, \epsilon\}, \quad l = \overline{1, s_2}, \quad (3)$$

Считается, что выброс частиц компонентов ($i = 1, 2$) сыпучей шихты из зазора «барабан-направляющая» происходит с конечных участков лопастей 4. Тогда особый интерес вызывает уравнение движения конечных точек проекций лопастей 5 на плоскость, перпендикулярную оси барабана 3, которое моделируется уравнением архимедовой спирали с константами a_p и b_p , зависящими от параметров подмножеств из выражений (2), (3)

$$r_{Ap}(\theta) = a_p + b_p \theta, \quad (4)$$

где θ – угловая координата полярной системы (r, θ) с центром в точке O' ($x_{O'} \equiv r_c \sin \alpha_0$; $y_{O'} \equiv r_c \cos \alpha_0$; $\alpha_0 \equiv 2\pi/n_B$) вычисляется при отсчете от вертикальной оси $O'x$, если центр декартовой системы Oxy принадлежит оси вращения барабана. Здесь индекс p соответствует основному ($p = 1$) и встречному ($p = 2$) направлениям движения гибких лопастей 5 в зазоре «барабан-направляющая». Уравнение (4) позволяет связать скорость частицы компонента ($i = 1, 2$) сыпучей шихты при ее сбрасывании лопастью $j = \overline{1, n_{bp}}$ ряда $p = 1, 2$ в направлении движения, соответствующем индексу p

$$V_{r\theta ij p}(r_{Djp}(\theta), \theta) = \omega r_{Djp}(\theta) / \cos\{\arctg[b_p/r_{Ap}(\theta)]\}, \quad (5)$$

Здесь точка D_{jp} находится на конце проекции гибких лопастей $j = \overline{1, n_{bp}}$ основного/встречного направления ($p = 1, 2$) на плоскость Oxy , где значение n_{bp} задает число деформированных лопастей после выхода из зазора «барабан-направляющая».

Описание распределения зернистых частиц компонентов сыпучей шихты

Анализ смещения зернистых компонентов в аппарате непрерывного действия предлагается выполнить, привлекая класс стохастических методов, предпочтительных в сравнении с детерминированными при изучении вероятностных процессов. В частности, в настоящей работе используется апробированный для данного типа задач [5, 6] энергетический метод Ю.Л. Климонтовича [7] вследствие необходимости расчета распределения зернистых частиц компонентов сыпучей шихты по угловой характеристике выброса конусных потоков из зазора «барабан-направляющая» с учетом физических свойств рабочего сырья и конструктивно-режимных параметров исследуемого процесса.

Введем ряд допущений, основными из которых являются следующие:

- частицы компонентов шихты ($i = 1, 2$) имеют сферическую форму и плотность ρ_i ;
- диаметры частиц зернистого сырья $d_i = s_d^{-1} \sum_{v=1}^{s_d} d_{iv}$ усредняются по классам крупности $v = \overline{1, s_d}$;
- сброс частиц разных компонентов происходит одновременно с одной лопастью $j = \overline{1, n_{bp}}$ ряда $p = 1, 2$, выходящей из зазора «барабан-направляющая»;
- образующиеся при этом конусные потоки компонентов ($i = 1, 2$) при выходе лопастей j одного ряда p из указанного зазора движутся в одном направлении;
- движение данных конусных потоков рассматривается в проекции на плоскость, перпендикулярную оси барабана 3 (рис. 1);
- частицы одного компонента i образуют макросистему, состояния которой не подвергаются макрофлуктуациям в отношении взаимных столкновений при движении в сонаправленных потоках, что позволяет привлечь формализм случайного процесса Орнштейна-Уленбека, как процесса Маркова, с описанием статистической функции распределения по энергии состояния макросистемы с помощью кинетического уравнения Фоккера-Планка.

Пусть элементарный фазовый объем $d\sigma_{ijp}$ имеет следующие два представления по двум фазовым переменным: (v_{xijp}, v_{yijp}) – проекциям на декартовую систему Oxy скорости частицы компонента i сыпучей шихты при ее сбрасывании лопастей j одного ряда p после выхода из зазора «барабан-направляющая» или (r_{ijp}, θ_{ijp}) – по координатам введенной полярной системы, тогда

$$d\sigma_{ijp} = dv_{xijp}dv_{yijp} = -\omega_i^2 r_{ijp} dr_{ijp} d\theta_{ijp}, \quad (6)$$

Используя стационарное решение уравнения Фоккера-Планка, можно рассчитать для компонента i в потоке после выходе лопастей j одного ряда p соответственно:

- число частиц dN_{ijp} в указанном элементарном фазовом объеме $d\sigma_{ijp}$

$$dN_{ijp} = A_{ijp} \exp(-E_{ijp}/E_{0i}) d\sigma_{ijp}, \quad (7)$$

- дифференциальную функцию распределения частиц по углу выброса θ_{ijp} из блока «барабан-лопасти»

$$g_{ijp}(\theta_{ijp}) = \frac{\left(\frac{1}{N_{ijp}}\right) dN_{ijp}}{d\theta_{ijp}}, \quad (8)$$

где согласно допущению о применимости формализма случайного процесса Орнштейна-Уленбека энергия частицы E_{ijp} компонента i (при описании вращения частицы относительно ее центра масс, его поступательного движения и упругого взаимодействия с гибкой лопастью j ряда p) имеет следующую зависимость от фазовых переменных при задании констант c_{1ijp} и c_{2ijp} , определяемых конструктивно-режимными параметрами подмножеств W_1 , W_2 из выражений (2), (3)

$$E_{ijp}(r_{ijp}, \theta_{ijp}) = c_{1ijp} r_{ijp}^2 + c_{2ijp} \theta_{ijp}^2, \quad (9)$$

Выражение (7) содержит параметр E_{0ijp} , который вычисляется с учетом смешивания компонентов ($i = 1, 2$) в сонаправленных конусных потоках при формулировке энергетического баланса в виде следующего уравнения

$$\sum_{i=1}^2 E_{1ijp} = \sum_{i=1}^2 E_{2ijp}, \quad (10)$$

где энергии макросистем компонентов соответственно при удержании частиц на лопастях во время выхода из зазора E_{1ijp} и при выбросе этих частиц лопастями E_{2ijp} в диапазоне изменения угловой координаты $\theta \in [\theta_{0ijp}; \theta_{1ijp}]$ учитывают представление $g_{ijp}(\theta_{ijp})$ из выражения (8). Заметим, что явный вид

Дифференциальные функции распределения частиц $g_{ijp}(\theta_{ijp})$ по углу выброса θ_{ijp} (явный вид которых не приводится вследствие громоздкости) для компонента i в потоке после выходе лопастей j одного ряда p из зазора «барабан-направляющая» (рис. 1) позволяют построить следующие типы функций распределения:

- после деформации гибких лопастей основного ($p = 1$) направления движения в одном ряду

$$G_{i1}(\theta_{i1}) = \prod_{j=1}^{n_{b1}} g_{ij1}(\theta_{ij1}), \quad (11)$$

- после деформации гибких лопастей встречного ($p = 2$) направления движения в одном ряду

$$G_{i2}(\theta_{i2}) = \prod_{j=1}^{n_{b2}} g_{ij2}(\theta_{ij2}), \quad (12)$$

- после деформации гибких лопастей основного ($p = 1$) и встречного ($p = 2$) направлений движения для двух последовательных рядов

$$G_i(\theta_{ijp}) = \prod_{p=1}^2 \prod_{j=1}^{n_{bp}} g_{ijp}(\theta_{ijp}), \quad (13)$$

- после деформации гибких лопастей основного ($p = 1$) и встречного ($p = 2$) направлений движения всех рядов ($\tau = \overline{1, n_r/2}$) для барабана 3 (рис. 1)

$$G_i(\theta_{ijp\tau}) = \prod_{\tau=1}^{\overline{n_r/2}} \prod_{p=1}^2 \prod_{j=1}^{n_{bp}} g_{ijp\tau}(\theta_{ijp\tau}), \quad (14)$$

где функция $g_{ijp\tau}(\theta_{ijp\tau})$ имеет аналогичное представлению выражению (8) при учете индекса $\tau = \overline{1, n_r/2}$ по числу парных рядов основного и встречного направлений движения лопастей барабана 3.

В качестве иллюстрации приводится пример расчета дифференциальных функций распределения частиц $g_{i11}(\theta_{i11})$, ($i = 1, 2$) по углу выброса θ_{i11} для кальцинированной соды ГОСТ 5100-85 и природного песка ГОСТ 8736-93 (рис. 2).

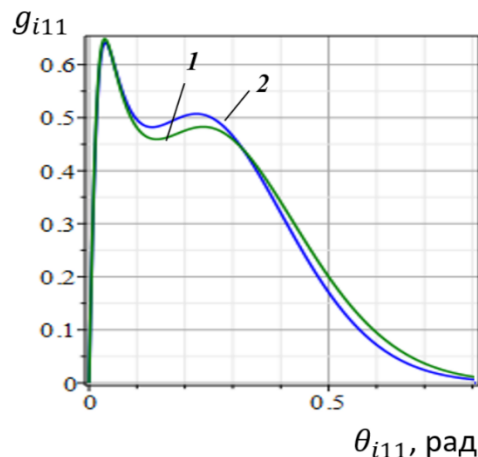


Рисунок 2 - Дифференциальных функций распределения частиц $g_{i11}(\theta_{i11})$, ($i = 1, 2$) по углу выброса θ_{i11} :
 1 – кальцинированная сода ГОСТ 5100-85 ($i = 1$); 2 – природный песок ГОСТ 8736-93 ($i = 2$); $\omega = 52$ с⁻¹

Из представленных графиков видно, что основной сброс материалов сыпучей шихты происходит при начальных значениях угла поворота барабана (см. максимумы на графиках 1 и 2, рис. 2), когда деформация лопастей значительная ($j = 1$). При этом наблюдаются условия самоочищения данных гибких лопастей, когда угловая координата меньше 0,3 рад для концов проекций гибких лопастей ($j = 1$) на плоскость Oxy при их основном направлении движения ($p = 1$) (см. локальные максимумы на графиках 1 и 2, рис. 2). Практическое совпадение первых всплесков для зависимостей $g_{111}(\theta_{111})$, $g_{211}(\theta_{211})$ соответствует критерию эффективного смешения данных компонентов зернистой шихты с помощью проектируемого блока «барабан-лопасти» аппарата непрерывного действия.

Заключение

В рамках данной работы проведен стохастический анализ процесса получения сыпучей шихты на примере непрерывного смешения ее основных компонентов в лопастном аппарате, который показал возможность эффективного смешения зернистых компонентов шихты уже на 1 этапе переработки. Выполнен выбор конструктивных и режимных параметров блока «барабан-лопасти» и построено описание дифференциальных функций распределения частиц по углу выброса, проиллюстрированных расчетом для кальцинированной соды ГОСТ 5100-85 и природного песка ГОСТ 8736-93. Полученные результаты могут быть использованы для вычисления коэффициента неоднородности получаемой зернистой смеси.

Список литературы

1. Хамков В.П. Материалы для производства и обработки стекла и стеклоизделий / В.П. Хамков, Е.А. Чугунов. М. : Высшая школа. 1987. 104 с.
2. Кафаров, В. В. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, С. Ю. Арутюнов. М. : Наука. 1985. 440 с.
3. Мешалкин В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико-технологических систем. Смоленск: ООО «Принт-экспресс», 2021. 442 с.
4. Пат. 2786074 Российская Федерация, МПК B01F 23/60, B01F 23/64. Устройство для смешения сыпучих материалов / А. Е. Лебедев, И. С. Гуданов, А. Б. Капранова, Д.С. Догин., А.А. Ватагин, Д.Д. Бахаева. – Оpubл. 16.12.2022.
5. To the calculation of the average value of the volume fraction of the key bulk component at the intermediate stage of mixing with an inclined bump / A. B. Kapranova, I. I. Verloka, D. D. Bahaeva, M. Yu. Tarshis, S. N. Cherpitsky // Frontiers in Energy Research: Process and Energy Systems. 2020. Vol. 8, article 35. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00135>.
6. Distribution of the components of the building mixture in the presence of secondary raw materials during rotary mixing / A. Kapranova, D. Bahaeva, D. Stenko, A. Vatagin, A. Lebedev, D. Lichak // E3s Web of Conference. 2020. V. 220, article 01060. – DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202022001060>
7. Климонтович Ю. Л. Турбулентное движение и структура хаоса: Новый подход к статистической теории открытых систем / Ю. Л. Климонтович. М. : ЛЕНАНД. 2014. 328 с.

УДК 378.147

Беляева Ю.А., Супрунова Е.А.

Роль электротехники и электроники в образовательном процессе подготовки специалистов химической промышленности

Беляева Юлия Александровна – к.т.н., доцент, доцент кафедры; beliaeva.i.a@muctr.ru

Супрунова Елена Антоновна – студент; ivanovmkcht2021@muctr.ru

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,
Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В тезисах рассмотрены особенности организации и проблемные вопросы образовательного процесса дисциплины «Электротехника и промышленная электроника» на кафедре «Процессы и аппараты химической технологии» при подготовке специалистов химической промышленности с точки зрения занимаемой роли в учебном процессе и взаимосвязи дисциплин, а также предлагаются варианты их решения.

Ключевые слова: дисциплина, электротехника, электроника, образовательный процесс, компетенции, инновационный подход, учебный план.

The role of electrical engineering and electronics in the educational process of training specialists in the chemical industry

Belyaeva Yu.A., Suprunova E.A.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The theses discusses the features of the organization and problematic issues of the educational process of the discipline "Electrical Engineering and Industrial Electronics" at the Department of "Processes and Apparatuses of Chemical Technology" in the training of specialists in the chemical industry from the point of view of the role occupied in the educational process and the relationship of disciplines, and also propose options for their solution....

Key words: discipline, electrical engineering, electronics, educational process, competencies, innovative approach, curriculum.

Как известно, основной целью образования является формирование личности и ее полноценное развитие. Для достижения этой цели требуется определенная организация образовательной деятельности, в рамках которой реализуется обучение учащихся в соответствии с учебным планом по направлению обучения. Правильно разработанный учебный план должен логически связывать отдельные дисциплины образовательной программы, учитывать их взаимосвязь, практическую направленность, и быть направленным на достижение обучаемыми конечных целей учебного процесса. От этого зависят результаты освоения образовательной программы и формирование у выпускника универсальных, общекультурных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по конкретному направлению. Молодой специалист, закончивший высшее учебное заведение, должен быть способен применять приобретенные знания, умения и навыки в нужной области.

Дисциплина «Электротехника и промышленная электроника» входит в число элективных дисциплин в объеме двух зачетных единиц и включает в себя 16 ч лекций и 34 ч лабораторных занятий. Основными ее задачами являются:

- 1) формирование минимально необходимых знаний основных электротехнических законов и методов анализа электрических, магнитных и электронных цепей;
- 2) усвоение принципов действия, свойств, областей применения и потенциальных возможностей основных электротехнических, электронных устройств и электроизмерительных приборов;
- 3) приобретение умения экспериментальным способом и на основе паспортных и каталожных данных определять параметры и характеристики типовых электротехнических и электронных устройств;
- 4) освоение современных информационных технологий для моделирования, анализа и проектирования электротехнических и электронных устройств и систем;
- 5) получение навыков основ электробезопасности.

Целью изучения дисциплины является теоретическая и практическая подготовка студентов и бакалавров неэлектрических специальностей в области электротехники и электроники в такой степени, чтобы они свободно могли выбирать необходимые электротехнические, электронные,

электроизмерительные устройства, уметь их правильно эксплуатировать, разрабатывать технические задания на разработку электрических частей автоматизированных установок для управления производственными процессами.

Роль дисциплины «Электротехника и промышленная электроника» в образовательном процессе сложно переоценить. Она состоит из двух отдельных научных областей: электротехники, как науки о практическом применении электрических и магнитных явлений и их использовании в практических целях, и электроники – науки, изучающей различные электронные приборы и устройства, их параметры, характеристики.

Основными дидактическими единицами дисциплины являются изучение электрических цепей постоянного тока и методы их расчета, цепей однофазного синусоидального тока, явления резонанса, трехфазные цепи и методов их расчеты, электрических машин, трансформаторов, двигателей, а также основных электронных приборов и устройств на их основе аналоговой и цифровой электроники. Очевидно, что такой объем учебного материала сложно уложить в рамки исключительно аудиторной нагрузки.

При проведении лабораторных занятий учитываются принципы, положенные в основу построения и развития системы инновационно-ориентированной подготовки будущих специалистов. Реализация этих целей предполагает решение следующих задач [1]:

- обновление материально-технического и информационно-программного обеспечения дисциплины;
- обеспечение компетентностного подхода, взаимосвязи академических знаний и практических умений;
- внедрение инновационной направленности научно-образовательной системы, включающая освоение новых форм и видов занятий;
- интеграция научной, учебной и инновационной деятельности, заключающаяся в расширенном освоении учебной программы и разработке собственных проектов, моделей, систем.

На лабораторных занятиях по электротехнике и электронике с помощью современных программных и технических средств развивается научное мышление и практические навыки проведения эксперимента в виртуальной лаборатории, производится исследование и измерение различных видов цепей. Причем предлагается использование нескольких видов моделирования электрических цепей имитационного и математического в новой методике, разработанной в РХТУ имени Д.И. Менделеева [2], что способствует расширению освоения компетенций в этой области.

Успех проведения лабораторных занятий зависит не только от правильной методики проведения эксперимента и технологии организации занятия, но и от предварительной самостоятельной работы учащихся.

Автоматизация учебного процесса в РХТУ поддерживается с помощью электронной информационно-образовательной системы – портала, на котором имеется вся необходимая информация для всех участников учебного процесса. В частности, для студентов доступны презентационные материалы и видеолекции для самостоятельного освоения отдельных разделов дисциплины. Кроме того, для проверки степени освоения материала предусмотрены тестовый контроль, включающий вопросы открытого и закрытого типов.

Наряду с инновационными педагогическими технологиями, такими как, например, дистанционное обучение, применяются интерактивные технологии в виде проблемных лекций, консультаций, дискуссий, где обучаемые могут представить свои мысли, идеи, аргументы в форме обсуждений [1, 3].

Знания в области электрооборудования и электротехнологий, полученные в ходе изучения дисциплины, тесно связаны с процессами и аппаратами в химической технологии, например, подбор необходимых источников и генераторов для питания разнообразных технологических аппаратов [4]. Развитие новых технологий и систем позволит улучшить эффективность, качество и безопасность производства в химической, фармацевтической и другой индустрии.

Для предотвращения возможных дефектов и контроля качества продукции используются системы контроля и мониторинга, основанные на электротехнических принципах. Также с помощью различных электротехнических систем и устройств можно автоматизировать множество химических операций, таких как смешивание, дозирование и др. Используя электротехнические методы изучаются физико-химические свойства новых лекарственных препаратов.

И будущее развитие электротехники и электроники ожидается по разным направлениям: внедрение интеллектуальных систем управления для мониторинга и контроля процессов

производства, использование робототехники для выполнения многозадачных процессов, разработка новых энергоэффективных технологий для снижения энергозатрат. Внедрение сенсорных технологий (датчики и IoT (интернет вещей)) позволит получить более точную и полную информацию о процессах производства [3].

Для проведения химических процессов используется различное электронное оборудование: это первичные и вторичные источники питания, релаксационные генераторы заданной формы, характеристики и принцип действия которых изучается также в рамках дисциплины и приобретаются навыки работы с ними в ходе выполнения лабораторных работ.

Направление «Информационные системы и технологии» и «Электротехника и электроника» тесно связаны между собой: при проведении моделирования электрических цепей, применяются современные программные среды [2], имитирующие различные процессы и явления в них. Они позволяют проводить исследования в цепях, а также упростить трудоемкие задачи анализа и синтеза, обработку полученных результатов.

С другой стороны, в развитии информационных технологий и элементов связи электротехника и электроника обеспечивает создание коммуникационных, компьютерных систем, сетей связи, устройств хранения данных, обеспечивает безопасность информации и стимулирует инновации. В этом случае необходимо больше времени уделять на изучение работы устройств аналоговой и цифровой электроники.

Воздействие электрического поля на протекание ряда химических процессов, например, диффузии, играет особую роль. И такие химические процессы, как гальваностегия (получение точных копий), рафинирование меди, электролитическая полировка, позволяет глубже понять поведение электрического заряда в различных средах (металле, полупроводниках, вакууме и различных газах). Будущий инженер, владеющий достаточным теоретическим запасом знаний математического и векторного анализа, с помощью современных информационных технологий без труда сможет решить задачи исследования электромагнитных устройств или задачи, связанные с повышением экономичности процесса выработки электроэнергии и ее распределения. Однако, классическая теория электромагнитного поля, изучается только в полном курсе «Теории электрических цепей» и не рассматривается в рамках «Электротехники и промышленной электроники».

Таким образом, дисциплина «Электротехника и промышленная электроника» играет не маловажную роль в становлении молодого специалиста в области химической промышленности. Еще до начала 2000-х годов в учебных планах будущих химиков-технологов уделялось немало времени на изучение данной дисциплины, включая расчетно-графические работы, а при дипломном проектировании была даже отдельная часть по расчету электротехнического оборудования. В настоящее время доля аудиторной нагрузки снизилась до минимума. Всё это не могло не отразиться и на качестве подготовки будущих специалистов.

Со стороны студентов также возникает все больше пожеланий увеличения объема лекций и введения учебных занятий семинарского типа практической направленности, на которых прорабатывались бы вопросы решения задач по электротехнике, электронике, анализа различного рода электрических цепей. Сжатое изложение лекций приводит к недопониманию студентом материала, не раскрывающего взаимосвязи с другими разделами дисциплины, отсутствия типовых примеров. И, наоборот, последовательное и подробное объяснение нового материала, усиленное примерами, приводит к не успеванию рассмотрения всех дидактических единиц, включенных в рабочую программу дисциплины, что также недопустимо. Контроль тем, предназначенных для самостоятельного освоения, также требует дополнительного времени. Кроме того, короткий лекционный курс заканчивается уже в середине семестра, и к началу сессии и проведению итогового контроля в той или иной степени успешно забывается, что отражается на степени освоения дисциплины студентами.

Поэтому, очевидно, что необходима полная модернизация содержания программы дисциплины и учебного плана направления подготовки с ориентацией на новые современные технологии и потребности общества. Наряду с физикой и высшей математикой электротехника и электроника должна относиться к основному блоку общепрофессиональных дисциплин и быть обязательной.

Очевидно, для полноценного освоения дисциплины требуется увеличение доли аудиторных часов, возможно, за счет уменьшения часов, выделенных на самостоятельную работу учащихся других дисциплин. Например, на изучение дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии», которой, согласно ФГОСу, отводится не менее 12 зачетных единиц, и для которой необходимы уже сформированные учащимися компетенции освоения теории электрооборудования,

электрических цепей, электронных устройств, и овладения ими навыков правильного выбора таких устройств и умения рассчитывать их параметры.

Придание практической направленности и прикладного характера, акцентирование определенных разделов данной дисциплины позволит выделить важные дидактические единицы для специальных дисциплин, изучаемых на старших курсах. В этом случае можно будет предложить новое название дисциплины, например, «Электрооборудование процессов и аппаратов химической технологии», «Теория электричества в различных средах», «Промышленная электроника в химической технологии», «Электротехника и электроника в информационных технологиях» и др.

Список литературы

1. Беляева Ю.А., Череватова Т.Ф. Инновационные подходы к подготовке научных и научно-педагогических кадров // Актуальные вопросы подготовки кадров в области гражданской обороны, предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций: сб. трудов Всероссийской науч.-практич. конф. – Химки: АГЗ МЧС имени генерал-лейтенанта Д.И. Михайлика, 2022. С. 43-35.
2. Титов А.А., Ю.А. Беляева Компьютерное моделирование электрических цепей в MULTISIM И MATCAD // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: двадцать шестая Международная науч.-технич. конф. студентов и аспирантов – Москва: ООО "Центр полиграфических услуг "Радуга", 2020. Стр.184.
3. Беляева Ю.А., Череватова Т.Ф. Актуальные проблемы развития научно-педагогических кадров в современных условиях и их стимулирование // Наука в эпоху глобализации и цифровизации: актуальные проблемы теории и практики: Материалы XX Всероссийской науч.-практич. конф. – Ставрополь: ООО "Ставропольское издательство "Параграф", 2022. С. 106-110.
4. Ситников И.А., Ильина С.И., Равичев Л.В., Свитцов А.А. Электрические процессы в химической технологии // Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. Том XXXVIII, № 9 (288). – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2024. С. 152-154.

УДК 66.011

Быков В.И., Ильина С.И., Равичев Л.В., Ситников И.А.

Оценка коэффициентов уравнений, полученных из уравнения переноса субстанции

Быков В.И. – ассистент, wladbig@gmail.com;

Ильина С.И. – к.т.н., доцент;

Равичев Л.В. – к.т.н., зав. каф.;

Ситников И.А. – ассистент.

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В тезисах рассмотрены базовые уравнения переноса, полученные из уравнения переноса субстанции, в том числе полученного нами уравнения конвективной электропроводности. Дана оценка коэффициентов этих уравнений, сделаны выводы о соотношении величин пограничных слоев.

Ключевые слова: уравнения переноса субстанции, уравнение Навье-Стокса, уравнение Фурье-Кирхгофа, уравнение конвективной диффузии, уравнение переноса заряда.

Estimation of coefficients of equations derived from the equation of substance transfer

Bykov V.I.¹, Ilyina S.I.¹, Ravichev L.V.¹, Sitnikov I.A.¹

¹D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

In the theses, we consider the basic transport equations derived from the substance transport equation, including the convective conduction equation obtained by us. An estimation of the coefficients of these equations is given, and conclusions are drawn about the relation of the boundary layer quantities.

Key words: equations of substance transfer, Navier-Stokes equation, Fourier-Kirchhoff equation, convective diffusion equation, charge transfer equation.

Обозначения

α – коэффициент температуропроводности, м²/с;

C – концентрация, моль/л;

C_m – удельная ёмкость, Ф/кг;

C_p – удельная теплоемкость, Дж/кг·К;

D – коэффициент диффузии, м²/с;

$\vec{J}$ – плотность потока;

i – плотность тока, А/м²;

d_3 – расстояние между электродами, м;

γ – плотность притока;

μ – вязкость, Па·с;

ρ – плотность, кг/м³;

ρ_v – плотность заряда, Кл/м³;

σ – удельная электропроводность, См/м;

t – температура, К;

τ – время, с;

φ – потенциал переноса;

ν – кинематическая вязкость, м²/с;

$\vec{v}$ – скорость, м/с;

λ – коэффициент теплопроводности, Дж/кг·К;

ε – диэлектрическая проницаемость;

ε_0 – электрическая постоянная, Ф/м;

Введение

В химической технологии существует большое количество электрохимических процессов, таких как электролиз, электрофлотация, электрокоагуляция и др. Однако, наряду с тепловыми, массообменными и гидромеханическими, процессы, протекающие под действием разницы электрических потенциалов, не вынесены в отдельную главу.

Традиционно явления переноса под действием электрического поля рассматриваются в разделах физики или электротехники и отличаются по принципу описания от вышеупомянутых (процессов

гидромеханики, теплообмена, массопереноса). Однако, как и в случае с массой, энергией, импульсом, заряд также является материей и, соответственно, логично было бы предположить, что для его переноса можно использовать аналогичное описание. При этом, изучая электроперенос в физике и электротехнике, мы обычно опираемся на перенос заряда электропроводностью и полем.

Основная часть

В настоящее время существует множество методов расчетов протекания процессов. Большинство из них основано на уравнениях, переноса которые могут быть получены из уравнения переноса субстанции, включающее в себя перенос на молекулярном и конвективном уровне, а также внешних сил (поля, химических реакций и тд.).

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = -\text{div} \vec{J} + \gamma, \quad (1)$$

Плотность потока включает характеристики переноса на молекулярном и конвективном уровнях, плотность притока обусловлена наличием поля и образованием материи в ходе химической реакции.

Как уже было отмечено, электрический заряд является материей. Исходя из этого нами было получено уравнение конвективной электропроводности [1]. Тогда перечень известных базовых уравнений переноса и предлагаемое нами уравнение конвективной электропроводности в случае неразрывности потока будут составлять следующую картину:

1. Перенос импульса описывается уравнениями Навье-Стокса. Уравнения отражают все составляющие, и для оси z записывается в виде

$$\rho \frac{\partial v_z}{\partial \tau} = -\rho g + \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 v_z, \quad (2)$$

Поле обусловлено силой тяжести.

2. Перенос тепловой энергии описывается уравнением Фурье-Кирхгофа

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \vec{v} \text{grad} t = a \nabla^2 t, \quad (3)$$

Уравнение Фурье-Кирхгофа объединяет молекулярный и конвективный перенос. Математически не затрагивает описание поля. Тепловое излучение обусловлено электромагнитными волнами.

3. Перенос массы описывается уравнением конвективной диффузии

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + \vec{v} \text{grad} C = D \nabla^2 C, \quad (4)$$

Уравнение конвективной диффузии, как ясно из названия, тоже рассматривает молекулярный и конвективный перенос. Очевидно, что и как в случае с переносом импульса, процессы протекают в поле сил тяжести. Необходимо отметить, что этот очевидный факт не нашел явного математического отражения в представленном уравнении.

4. Перенос заряда описывается уравнением конвективной электропроводности

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial \tau} + \vec{v} \text{grad} \rho_v = b \nabla^2 \rho_v, \quad (5)$$

где b - коэффициент зарядопроводности (по аналогии с коэффициентом температуропроводности из уравнения Фурье-Кирхгофа)

Рассмотрев правые части уравнений, можно сделать вывод, что коэффициенты уравнений, полученные из уравнения переноса субстанции, а именно, диффузии D , кинематической вязкости ν , температуропроводности a и «зарядопроводности» b , совпадают по размерностям:

$$\begin{aligned} D &= \left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right] \\ \nu &= \frac{\mu}{\rho} = \left[\frac{\frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}}{\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} \right] = \left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right] \\ a &= \frac{\lambda}{C_p \rho} = \left[\frac{\frac{\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}}{\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{кг} \cdot \text{К}} * \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}}{\frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{\text{кг} \cdot \text{К}} * \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} \right] = \left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right] \end{aligned}$$

$$b = \frac{\sigma}{C_m \rho} = \left[\frac{\frac{\text{Кл}}{\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{м}}}{\frac{\text{Кл}}{\text{В} \cdot \text{кг}} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} \right] = \left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right]$$

Для удобства расчетов коэффициент зарядопроводности можно преобразовать:

$$b = \frac{\sigma d_3^2}{\varepsilon \varepsilon_0}, \quad (6)$$

Так как соотношения данных коэффициентов будут характеризовать соотношения толщин пограничных слоев, то нами была предпринята попытка их оценки.

Для воздуха, как пример вещества в газообразном состоянии, воды различных солесодержаний, а также масла, представляющего собой диэлектрическую жидкость, нами были рассчитаны коэффициенты температуропроводности, зарядопроводности и кинематический коэффициент вязкости при различных температурах [2, 3] и представлены в таблицах 1-5.

Воздух является газообразным веществом в заданном интервале температур, а, как известно, все газообразные вещества являются диэлектриками. Коэффициент диффузии веществ в газах составляет $\sim 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Все коэффициенты имеют одинаковый порядок.

Таблица 1

Коэффициенты уравнений для воздуха			
$t, ^\circ\text{C}$	$a \cdot 10^5, \text{ м}^2/\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	$b \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$
-20	1,67	1,19	1,47
0	1,9	1,34	1,47
20	2,14	1,52	1,47
40	2,4	1,66	1,47
60	2,66	1,86	1,47

Вода, в зависимости от концентрации растворенных веществ, может являться как проводником (артезианская и морская вода), так и диэлектриком (дистиллированная вода). Коэффициент диффузии веществ в воде $\sim 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$. Коэффициент зарядопроводности значительно больше других коэффициентов.

Таблица 2

Коэффициенты уравнений для дистиллированной воды			
$t, ^\circ\text{C}$	$a \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	$b \cdot 10^{-5}, \text{ м}^2/\text{с}$
-20	-	-	-
0	1,34	1,79	1,41
20	1,43	1	1,41
40	1,51	0,66	1,41
60	1,58	0,48	1,41

Таблица 3

Коэффициенты уравнений для артезианской воды			
$t, ^\circ\text{C}$	$a \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	$b \cdot 10^{-5}, \text{ м}^2/\text{с}$
-20	-	-	-
0	1,34	1,79	5,65
20	1,43	1	4,7
40	1,51	0,66	5,4
60	1,58	0,48	0,14

Таблица 4

Коэффициенты уравнений для морской воды

$t, ^\circ\text{C}$	$a \cdot 10^7, \text{м}^2/\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$b \cdot 10^{-9}, \text{м}^2/\text{с}$
-20	-	-	-
0	1,34	1,79	5,65
20	1,43	1	5,65
40	1,51	0,66	5,65
60	1,58	0,48	5,65

Трансформаторное масло является жидким диэлектриком. Коэффициент диффузии веществ в масле $\sim 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ [4]. Кинематическая вязкость и коэффициент зарядопроводности имеют одинаковый порядок, значительно превышающий коэффициент температуропроводности и диффузии.

Таблица 5

Коэффициенты уравнений для трансформаторного масла

$t, ^\circ\text{C}$	$a \cdot 10^7, \text{м}^2/\text{с}$	$\nu \cdot 10^3, \text{м}^2/\text{с}$	$b \cdot 10^3, \text{м}^2/\text{с}$
-20	1,04	-	0,4
0	1	-	0,94
20	0,96	1,51	1,97
40	0,90	0,34	3,77
60	0,84	0,11	6,7

Заключение

Из этого можно сделать выводы, что коэффициенты в газовой фазе и диэлектриках соизмеримы, а в жидких электролитах коэффициент зарядопроводности превышает остальные на много порядков.

Таким образом, интерес представляет тот факт, что при наложении электрического поля на аппарат, если в аппарате находится электролит, электрический пограничный слой будет больше габаритных размеров аппарата и, таким образом, аппарат будет работать в области влияния электрического поля. Вследствие чего при моделировании процесса требуется учитывать электрические параметры системы.

Список литературы

1. Математическое описание электро-массообменных процессов на основе уравнения переноса субстанции / Равичев Л.В., Ильина С.И., Логинов В.Я., Быков В.И., Титов А.А. / ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ, Т.57, №5, С. 612-616
2. Справочник по электрохимии / под А.М. Сухотина. – Л.: Химия, 1981. – 488 с.
3. Физические свойства наиболее известных химических веществ: Справочное пособие / Бобылев В.Н.-РХТУ им. Д. И. Менделеева. –М., 2003. –24 с.
4. Определение коэффициента диффузии водорода в трансформаторном масле / А.Л. Бычков, С.М. Коробейников, А.Ю. Рыжкина // Журнал технической физики, 2011, том 81, №3, С.106-107.

УДК 66.011

Быков В.И., Ильина С.И., Касаткин А.М.

Применимость текущих инструментов на основе искусственного интеллекта в задачах химической технологии

Быков Владислав Игоревич – ассистент кафедры ПАХТ

Ильина Светлана Игоревна – к.т.н., доцент кафедры ПАХТ

Касаткин Александр Михайлович – студент; sasha.kasatkin@inbox.ru

В данных тезисах проведен анализ способностей решения задач области химической технологии с помощью инструментов на основе технологии искусственного интеллекта. Дана оценка возможностей ИИ-агентов на текущем этапе развития. Сформулировано заключение о возможности применения таких средств как альтернативы специалистам.

Ключевые слова: Искусственный интеллект, слабый искусственный интеллект, сильный искусственный интеллект, химическая технология, процессы и аппараты химической технологии.

The applicability of current artificial intelligence-based tools in chemical technology tasks

Bykov V.I., Ilina S.I., Kasatkin A.M.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

In these discusses was carried out analysis of the abilities of solving problems in the field of chemical technology using tools based on artificial intelligence technology. An assessment of the capabilities of AI agents at the current stage of development is given. The conclusion is formulated about the possibility of using such tools as an alternative to specialists.

Keywords: Artificial intelligence, weak artificial intelligence, strong artificial intelligence, chemical technology, processes and devices of chemical technology

Введение

За последние 5 лет одной из наиболее инновационных и стремительно развивающихся областей наукоемких деятельности является разработка искусственного интеллекта. Это связано в первую очередь с универсальностью его применения в самых разных родах деятельности и отраслях, что способствует повышению их эффективности.

Именно активное внедрение искусственного интеллекта в каждый этап синтеза и эксплуатации производственного процесса является важной составляющей четвертой промышленной революции. Такие глобальные и фундаментальный процессы сопровождаются сопротивлением со стороны специалистов, которые могут быть «заменены», что и произошло за последние несколько лет в среде творческих профессий.

Определение пределов не только нынешних, но и потенциальных возможностей искусственного интеллекта является важным параметром сопоставления ИИ-агентов и специалистов, а также установления их как легитимных инструментов для работы.

Основная часть

Технологии искусственного интеллекта являются одними из передовых существующих, получившие колоссальное развитие за предыдущее десятилетие. В виду данного факта, а также крайне быстрой скорости обучаемости и развития различных моделей искусственного интеллекта, достаточно емкая и точная классификация и определение являются трудновыполнимой задачей. При этом из-за всё большей распространенности растет осведомленность о существовании подобных технологий, что приводит к формированию интуитивных и не объемлющих описаний, что лишь возводит барьеры при попытках понимания и классификации со стороны различных исследователей.

Согласно одному из принятых определений, искусственный интеллект (ИИ) – комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека (включая самообучение, поиск решений без заранее заданного алгоритма и достижение инсайта) и получать при выполнении конкретных практически значимых задач обработки данных результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека [1].

В соответствии с данной и подобными попытками определения ИИ принято его разделять на 3 категории:

1) Слабый интеллект, который чаще всего подготавливается для определенной задачи, и генерирует решение на основе заранее подготовленных и обработанных шаблонов. Данный тип хорошо изучен и сформулирован и, как следствие, достаточно обширно используется для самых различных, но при этом узконаправленных задач [2].

2) Сильный интеллект, который способен решать широкий спектр задач, генерируя решение на основе логических заключений из вводных данных, а не из заранее заготовленных шаблонов. Данная категория способна к самоанализу и обладает автономностью, что пока что свойственно исключительно человеку [3].

3) Сверхинтеллект, который на данный момент является лишь концепцией. Предполагается, что на данной ступени развития ИИ опережает человека в области анализа и понимания окружающего мира. Является уникальной и автономной единицей интеллекта, не требующей внешней информации для собственного развития [2].

Еще одной важной характеристикой является способ обучения, который применялся при создании ИИ-ботов. Наибольшую работоспособность проявляют модели, основанные на следующих способах обучения [4]:

- Предварительное обучение, базирующееся на огромном количестве текста. На данном этапе происходит тренировка общего понимания языка.
- Дообучение, целью которого является адаптация под конкретные задачи и общее улучшение качества модели и метода её работы.
- Обучение с подкреплением. Такой способ основан на обратной связи на ответы агента от «учителя», который чаще всего является слабым ИИ.
- Обучение с подкреплением на основе отзывов людей. Аналогичен методу обучения с подкреплением, но изменения в модели и ответах основываются на отзывах людей.

На данном этапе развития технология ИИ находится между первой и второй категорией. Несмотря на существенное расширение возможностей и области применения ИИ-агентов (общий анализ информации, генерация медиа, математическая оптимизация задач), основная часть информации, на основе которой они генерируют ответы на запрос пользователя, получается по прямому запросу в сети интернет или в слабые ИИ. Данная модель генерации решений не соответствует определению сильного ИИ, а значит не аналогична человеку, но может с определенным успехом имитировать его деятельность.

Наибольший интерес для химиков-инженеров представляют ИИ-агенты, основной целью которых является общий сбор и анализ информации для решения задач синтеза химико-технологического процесса от моделирования процессов и оптимальных условий до подбора аппаратного оформления. Однако наиболее ценным свойством ИИ-агентов, как вспомогательных инструментов для специалистов, является возможность быстрого поиска и каталогизирование справочных данных согласно описанной проблеме. Существующие на данный момент чат-боты уже способны на такую деятельность. Далее будет приведено сравнение схожих ИИ-агентов и их решений 3-х идентичных задач: «Приведи наиболее оптимальные условия окисления диоксида серы», «Приведи характеристику и примеры аппаратуры для улавливания хлороводорода из воздушной смеси» и «Приведи данные по зависимости плотности этилового спирта от температуры. Рассчитай плотность бинарной смеси этанол-вода с мольной долей спирта 32% и температурой смеси 27 градусов».

Достаточно любопытные ответы дал чат-бот на отечественной технологии YandexGPT 5. Из тестируемых он единственный дал обоснование верхнему и нижнему пределу температурного режима для первого вопроса, а также указал на ДКДА систему. Однако дал относительно скудные ответы на второй и третий запросы, не обосновывая вычисления и выдав скромные допустимо ошибочные данные (рисунок 1).

Для чистого этилового спирта (этанола) зависимость плотности от температуры имеет следующий характер:

Температура (°C)	Плотность (г/см ³)
0	0.789
10	0.785
20	0.783
30	0.780
40	0.777

Рисунок 1 - Данный по третьему запросу приведенный ИИ-агентом на основе YandexGPT 5.

Более точным себя показал чат-бот компании Google на технологии Gemini Flash 2.0. При ответе на первый запрос им были выданы достаточные и при этом обоснованные ответы. На второй запрос был приведен широкий список подходящих аппаратов с примером готовых решений от различных компаний с перечислением их принципов работы, преимуществ и недостатков. Также данный ИИ-агент выдал наиболее полные данные (рисунок 2), расписав и обосновав вычисления.

Температура (°C)	Плотность (г/см³)
-10	0.816
0	0.806
10	0.797
20	0.789
30	0.781
40	0.772
50	0.764
60	0.755
70	0.746
80	0.736
90	0.727
100	0.717

Рисунок 2 - Таблица данных по третьему запросу, составленная ИИ-агентом на основе Gemini Flash 2.0

Наибольшие ожидания вызывал ChatGPT на основе модели GPT-o1. Он выдавал наиболее развернутые ответы, которые тем не менее не были достаточно обоснованы. С первым и вторым запросами данный ИИ-агент справился неплохо, однако на третьем запросе у него возникли трудности. Во-первых, это связано с неверно приведенными данными по запросу (рисунок 3) и, как следствие, неверно проведенными расчетами, которые были скрыты.

Температура (°C)	Плотность (г/см³)
0	0.789
10	0.785
20	0.789
30	0.785
40	0.782
50	0.779
60	0.775
70	0.772
80	0.768

Рисунок 3 - Таблица данных по третьему запросу, составленная ChatGPT на основе модели GPT-o1

В последнее время большую популярность получил чат-бот DeepSeek, созданный по методу дистилляции на основе модели GPT-o1. На первый запрос он ответил достаточно подробно, отдельно помечая важные детали. Преподнес крайне подробный и разобранный список аппаратуры по второму запросу. При ответе на третий запрос выдал данные (рисунок 4) аналогичные ИИ-агенту на основе YandexGPT 5, со свойственными ему ошибками. Однако при этом данный ИИ-агент обладает крайне важной особенностью – формулированием расчетов. Данный бот не просто приводит необходимые для расчета формулы, но и оперирует ими для нахождения искомых значений.

Температура, °C	Плотность, г/см ³
0	0.806
10	0.798
20	0.789
30	0.781
40	0.772

Рисунок 4 - Таблица данных по третьему запросу, составленная DeepSeek на основе дистилляции модели GPT-o1

Все указанные агенты продемонстрировали достаточный уровень анализа, сопоставимый со студентом-бакалавром. При дополнительных подсказках и наводках решают задачи олимпиадного и проектного уровня. Фактически, при опросах ИИ-агентов были получены удовлетворительные ответы, при уточнении отдельных структур которых итоговое решение было сопоставимо с профессиональным. Однако каждый из приведенных ботов отличается не только по форме подачи, но и по методу поиска и обработки информации, что достаточно заметно в таблицах данных, которые требовалось привести в третьем запросе. Общие характеристики отдельных агентов по некоторым критериям приведенных ими ответов для удобства сравнения приведены в таблице 1.

Таблица 1.

ИИ-агент	Обширность	Обоснованность	Достоверность	Открытость
YaGPT	Удовлетворительно	Хорошо	Хорошо	Неудовлетворительно
Gemini	Хорошо	Удовлетворительно	Отлично	Хорошо
ChatGPT	Отлично	Хорошо	Удовлетворительно	Неудовлетворительно
DeepSeek	Удовлетворительно	Хорошо	Удовлетворительно	Отлично

Однако основным и наиболее существенным недостатком подобных агентов является именно поиск задач и решений аналогичных заданной проблеме, при этом отсутствует самоанализ принятых решений, а значит уникальные и передовые проблемы находятся за гранью возможностей ИИ-агентов для анализа и сбора информации, что наглядно отражено в критериях открытости и достоверности полученных ответов. Еще одним немаловажным недостатком является неспособность оптимизировать ответы. Они никогда не получаются идентичными при одинаковых запросах, хотя и содержат основную суть, что делает невозможным ссылку или цитирование ИИ-агентов в качестве аргумента.

Важно отметить, что несмотря на разницу между языковыми моделями, разница между версиями одной и тоже модели куда более существенная. За последние 7 лет произошел скачок от невозможности пройти тест Тьюринга до интеграции в системы общения. Наиболее заметен прогресс на изменениях в моделях ChatGPT. За 3 поколения точность ответа на технические вопросы возросла с 43% до 79%. Данное развитие заняло чуть больше 4 лет и прогрессировало геометрически.

Еще одним весьма полезным для химической отрасли типом ИИ-агентов является генерирующий чертежи и модели. Наибольший успех данные агенты имеют при использовании компьютерного зрения (способности получать, обрабатывать и интерпретировать визуальные данные [1]). На текущем этапе развития генеративные способности ИИ нацелены больше на абстрактные изображения, основанные на словесном описании или примеров изображений, что не позволяет достичь приемлемого уровня при генерации строгих структур, которыми являются чертежи и модели. При попытках генерации наблюдается общая деформация, что напрямую связано с невозможностью ИИ-моделей, созданных для генерации изображений, полноценно понимать пространство и положение объектов в нем. Даже по готовым чертежам генерация моделей оставляет желать лучшего (рисунок 5).

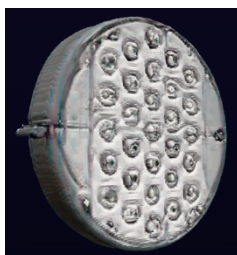


Рисунок 5 - Пример модели ситчатой тарелки, сгенерированной на основе чертежа

Но стоит указать на временность невозможности генерации строгих моделей и рисунков. Развитие сектора ИИ-технологий не останавливается ни на секунду, и строго ограничить рамки потенциального развития. Наглядно это можно продемонстрировать на базе сервиса «Шедеврум» на основе модели YandexART. Данная модель ведет своё развитие уже на протяжении 2-х лет, предоставив в открытый доступ 4 модели для генерации изображений. На рисунках 6 и 7 сопоставлены генерации изображений кожухотрубчатого теплообменника и ситчатой тарелки между версиями.

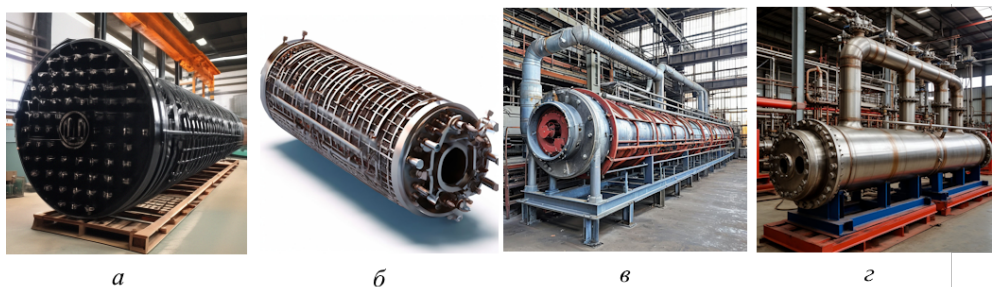


Рисунок 6 - Кожухотрубчатый теплообменник, сгенерированный разными версиями YandexART: а – версия 1.2; б – версия 1.3; в – версия 2.0; г – версия 2.5

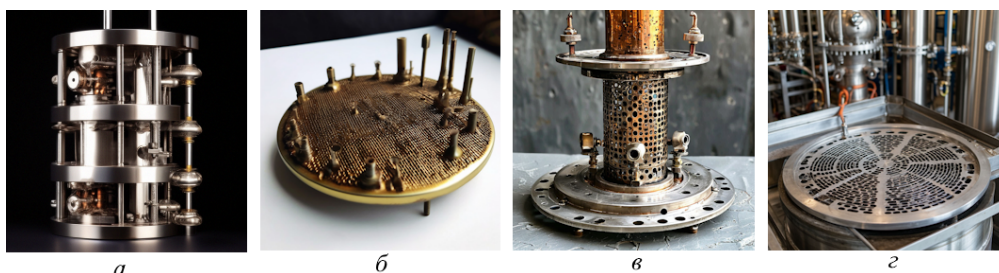


Рисунок 7 - Ситчатая тарелка, сгенерированная разными версиями YandexART: а – версия 1.2; б – версия 1.3; в – версия 2.0; г – версия 2.5

За два года разработки нейросетевая модель YandexArt смогла не только существенно сократить время генерации с десятка минут до десятка секунд, но и как общее, так и смысловое качество изображений. На приведенных примерах заметно возникновение (с версии 2.0) и развитие учета контекста запроса, что существенно улучшает общую генерацию и в дальнейшем может сделать возможным применение ИИ-агентов для строгой графической работы.

Заключение

На данном этапе развития ИИ, агенты на основе данной технологии способны решать базовые задачи широкого спектра. Крайне перспективные результаты показывают инструменты на основе языковых моделей, которым продемонстрированы способности к весьма подробным ответам, при этом уточняющие при запросах детали приеденных решений. При этом генерация моделей и чертежей при взаимодействии «человек-компьютер» требует серьезных доработок и улучшений, чтобы стать достойной альтернативой схемам, которые созданы человеком.

Однако несмотря на значительные успехи даже в области синтеза технологического процесса, полностью заменить специалиста в данный момент невозможно. Во-первых, это связано с невозможностью генерации уникальных объектов, так как все решения ИИ принимаются аналогично человеческим, и не способны решить новые проблемы. Во-вторых, у агентов отсутствует понимание

сути и первопричин решаемых задач, что может привести к неверным решениям и серьезным последствиям.

В следствии проведенного анализа, ИИ-агенты уже могут рассматриваться как превосходный инструмент, повышающий эффективность специалистов, качество и скорость синтеза технологических процессов и аппаратов. При этом не являются полноценной заменой специалистов в профессиональной деятельности.

Список литературы

1. ГОСТ Р 59277-2020. Национальный стандарт Российской Федерации. «Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта» // Сайт Росстандарта. — URL: <http://protect.gost.ru/v.aspx?control=8&baseC=6&id=229236> (дата обращения: 10.03.2025)

2. Бутченко Е.Ю., Казимов Д.М. Искусственный интеллект и искусственные нейронные сети, метод глубокого обучения нейросетей искусственного интеллекта / Е.Ю. Бутченко, Д.М. Казимов // Научные достижения в XXI веке: Модернизация, инновации, прогресс. — Анапа: ООО «Научноисследовательский центр экономических и социальных процессов» в ЮФО, 2023. — С. 49-53.

3. Худайбедиева Н.А., Чарыев М.С., Азадов А.А. Слабый и сильный искусственный интеллект: различия и перспективы различия / Н.А. Худайбедиева, М.С. Чарыев, А.А. Азадов / Вестник науки. — 2024, — №4 (73), — С. 443-446.

4. SecurityLab: Почему ChatGPT так хорошо понимает русский? Всё о многоязычном обучении нейросетей [Электронный ресурс] URL: <https://www.securitylab.ru/blog/personal/xiaomite-journal/354300.php> (дата обращения: 09.03.2025)

УДК 66.03

Валеев А.Р., Чуракова С.К.

Сравнительный анализ некоторых конструкций устройств ввода жидкой фазы методом CFD-моделирования

Валеев Анвар Ринатович – аспирант; spestersnape@gmail.com.

Чуракова Светлана Константиновна – д.х.н., профессор кафедры НХТ;

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,

Россия, Уфа, 460062, ул. Космонавтов, 1.

В тезисах рассмотрены некоторые распространённые варианты конструкций распределителей жидкой фазы. Проведена оценка равномерности распределения средствами CFD-систем и выполнен сравнительный анализ эффективности различных вариантов устройств.

Ключевые слова: CFD-анализ, распределение потоков, распределительное устройство, функция эффективности распределения.

Comparative analysis of some designs of liquid inlet devices using CFD modeling

Valeev A.R.¹, Churakova S.K.¹

¹ Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

Theses consider some common variants of liquid phase distributor designs. The uniformity of distribution is assessed using CFD systems and a comparative analysis of the efficiency of various device variants is performed.

Key words: CFD analysis, flow distribution, distribution device, distribution efficiency function.

Введение

Для достижения эффективной работы контактных устройств в массообменных аппаратах ключевым фактором является равномерное распределение потоков. Неравномерное распределение потоков может, в частности, привести к снижению КПД внутренних контактных устройств [1].

В данной работе приведены результаты CFD-анализа наиболее распространенных конструкций устройств ввода жидкостного потока, а также сравнение с работой аппарата без специальных устройств ввода [2].

Ниже приведено описание рассмотренных конструкций.

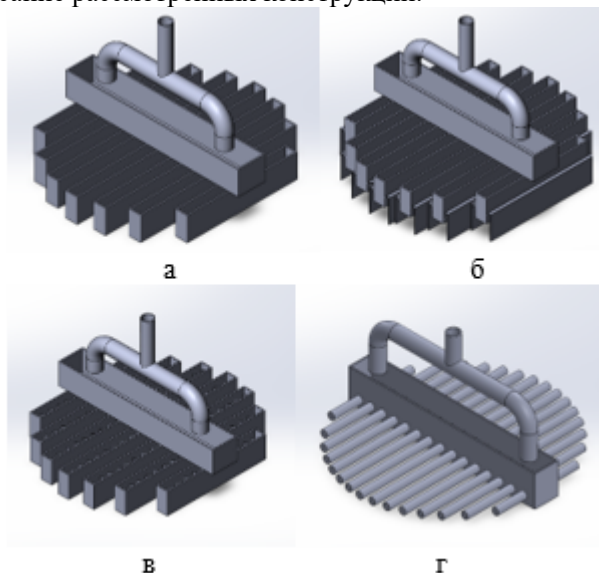


Рисунок 1 - 3D-модели конструкций устройств ввода паровой фазы

- а) желобчатый распределитель с отверстиями в плите; б) желобчатый распределитель с отражательными перегородками; в) желобчатый распределитель с поперечными трубками; г) трубчатый распределитель

На рисунке 1а представлен желобчатый распределитель, представляющий собой центральное корыто, а также желобов с отверстиями в нижней части.

На рисунке 1б представлен желобчатый распределитель, отличающийся от предыдущего тем, что отверстия расположены в боковых стенках желобов, а также наличием отражательных перегородок.

На рисунке 1в представлен желобчатый распределитель, также состоящий из центрального корыта и желобов, но отличающийся наличием поперечных трубок с отверстиями.

На рисунке 1г представлен трубчатый распределитель жидкости, состоящий из центрального корыта и перфорированных трубок.

Методология расчетного исследования

Расчетные исследования проводилось при помощи программного пакета ANSYS CFX, расчет проводился согласно модели турбулентности потока k-ε. Расчетная сетка тетраэдрической формы, размер элемента сетки 5 мм, размер элемента сетки возле стенок узла ввода уменьшается до 1 мм, что необходимо для правильного и адекватного расчета гидродинамических явлений в пограничном слое. Граничные условия расчета: перепад давления на выходе из элемента колонны (верх и низ) равен 0 Па, на входе в аппарат задается массовый расход входящего потока.

Для каждой рассматриваемой конструкции, а также для случая подачи жидкости напрямую в штуцер без специальных устройств ввода расчет проводился для в диапазоне от 5000 до 50000 кг/ч с шагом в 5000 кг/ч.

Исходные данные для расчета параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования устройств ввода паровой фазы

Параметр		Значение
Диаметр аппарата, м		1
Среда	Жидкостной поток	Вода
	Встречный паровой поток	Воздух
Плотность, кг/м ³	Жидкостной поток	1000
	Встречный паровой поток	1,295
Расход встречного парового потока, м ³ /ч		1590

Результаты расчета и выводы

В результате CFD-анализа рассчитываются скорости каждой фазы по объему колонны, концентрации фаз, распределение давления в объеме колонны. На рисунках 2–6 приведены поля концентраций жидкой фазы в поперечном сечении аппарата, находящемся на 200 мм ниже распределительного устройства (или ниже штуцера ввода жидкости для случая подачи без специального распределительного устройства) при расходе жидкой фазы 25000 кг/ч.

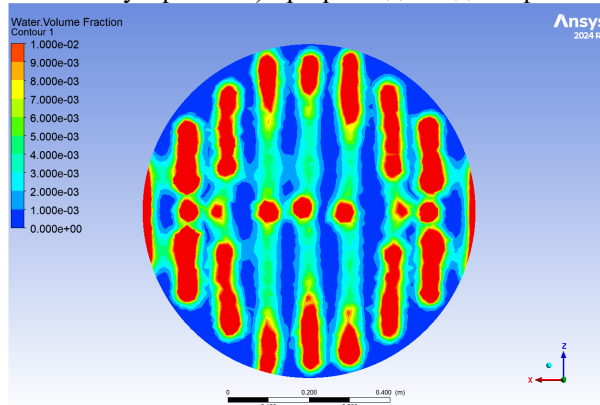


Рисунок 2 - Поля концентраций в поперечном сечении для желобчатого распределителя с отверстиями в плите

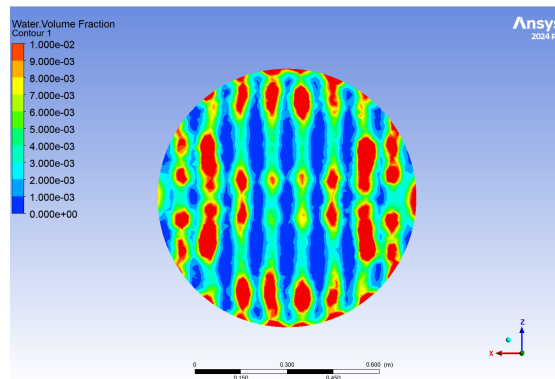


Рисунок 3 - Поля концентраций в поперечном сечении для желобчатого распределителя с отражательными перегородками

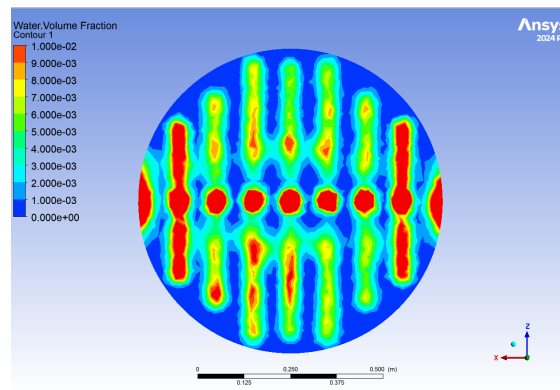


Рисунок 4- Поля концентраций в поперечном сечении для желобчатого распределителя с поперечными трубками

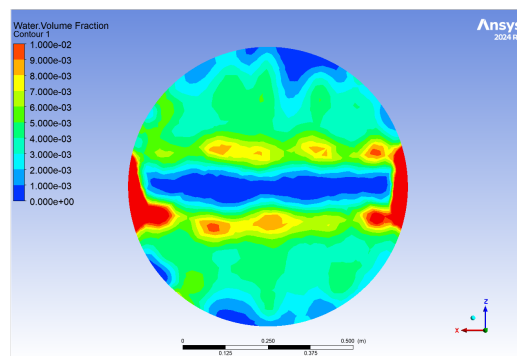


Рисунок 5 - Поля концентраций в поперечном сечении для трубчатого распределителя

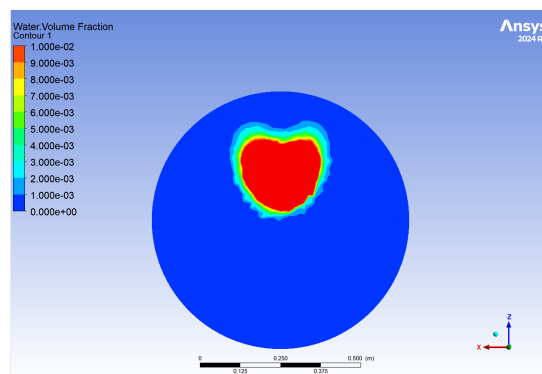


Рисунок 6 - Поля концентраций при подаче без специального устройства ввода

Для оценки эффективности распределения рассмотрена функция эффективности распределения [3]:

$$\Phi(v) = \frac{1}{1+v}, \quad (1)$$

где, v – коэффициент вариации концентрации жидкой фазы. Сечение S_{xy} для всех вариантов принято на 200 мм ниже распределительного устройства.

На рисунке 7 приведен график зависимости функции эффективности расхода жидкой фазы.

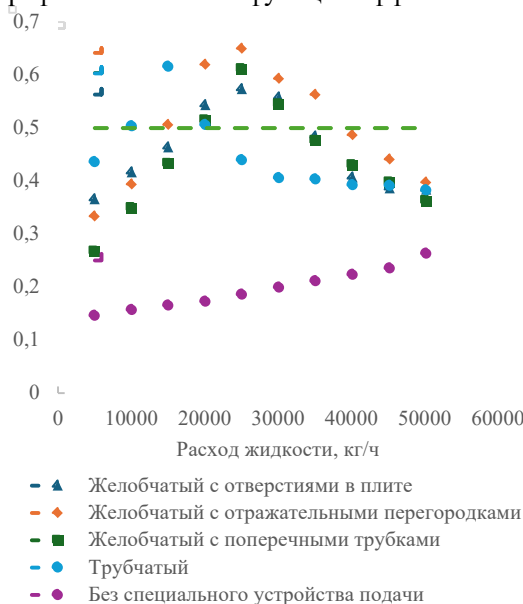


Рисунок 7 - График зависимости функции эффективности распределения от расхода жидкой фазы

Из графика видно, что при подаче жидкости без специального устройства подачи эффективное орошение не достигается во всем рассматриваемом диапазоне (функция эффективности распределения меньше 0,5). При этом зависимость носит линейный характер, что связано с увеличением турбулизации потока с ростом скорости.

Результаты сравнительного анализа различных конструкций устройств ввода жидкой фазы, проведенного методом CFD моделирования в среде ANSYS CFX, свидетельствуют о том, что все рассмотренные конструкции показывают эффективное распределение жидкости в некотором диапазоне расходов. При этом в описанных условиях наиболее широким диапазоном работы обладает желобчатый распределитель с отражательными перегородками, для него значение функции эффективности распределения выше 0,5 достигается в диапазоне от 14800 до 39300 кг/ч. Практически в том же диапазоне находятся желобчатый распределитель с отверстиями в плите и желобчатый распределитель с поперечными трубками (эффективный диапазон от 17300 до 34000 кг/ч и от 19200 до 33400 кг/ч, соответственно). Трубчатый распределитель в рассмотренных условиях обладает сравнительно меньшим диапазоном (от 9700 до 20600 кг/ч), однако, показывает себя наиболее эффективной конструкцией в нижней области рассмотренного диапазона подачи жидкой фазы.

Список литературы

1. Чуракова, С.К. Сравнение областей устойчивой работы ситчатой тарелки и клапанной тарелки PETON с подвижным круглым клапаном / С.К. Чуракова, Д.В. Лесной, Т.И. Маннанов, Е.К. Константинов, К.А. Муллабаев // Новые направления работ на нефть и газ, инновационные технологии разработки их месторождений, перспективы добычи нетрадиционного углеводородного сырья: материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Оренбург, 2019. – С. 175-178.
2. Анализ конструкций распределительных устройств для колонных аппаратов: Материалы 56-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ / Подгорнов К.В., Тукаева Р.Б // УГНТУ. - Уфа : Изд-во УГНТУ, 2005. - 122 с.
3. Муллабаев К.А., Чуракова С.К., Валеев А.Р. Разработка методов оценки равномерности распределения фаз в насадочных экстракторах средствами CFD-систем // Башкирский химический журнал. – 2022. – Т.29. – №2. – С.71-76

УДК 536.755

Вишняк Д.Д., Кольцова Э.М., Женса А.В., Гаврилова Н.Н.

Применение вариационных принципов для агрегативной устойчивости наночастиц оксида церия

Вишняк Даниил Дмитриевич – студент кафедры информационных компьютерных технологий (ИКТ);

Кольцова Элеонора Моисеевна – д.т.н., заведующий кафедрой ИКТ; koltsova.e.m@muctr.ru

Женса Андрей Вячеславович – к.т.н., доцент кафедры ИКТ;

Гаврилова Наталья Николаевна – д.х.н., заведующий кафедрой коллоидной химии.

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

Исследована агрегативная устойчивость системы ZrO_2 в широком диапазоне pH-среды. Для моделирования агрегативной устойчивости использована обобщенная теория ДЛФО. Для определения параметров структурной составляющей расклинивающего давления использован вариационный принцип минимума производства энтропии. Определены предельные размеры частиц агрегативно устойчивой системы.

Ключевые слова: дробление частиц, математическое моделирование, плотность распределения по размерам, разностная схема, размер частиц устойчивых к дроблению.

Application of variational adapters for aggregation stability of serium oxide nanoparticles

Vishnyak D.D., Koltsova E.M., Zhensa A.V., Gavrilova N.N.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The aggregative stability of the ZrO_2 system was studied in a wide range of pH environments. The generalized DLVO theory was used to model the aggregative stability. The variational principle of minimum entropy production was used to determine the parameters of the structural component of the disjoining pressure. The limiting particle sizes of the aggregatively stable system were determined.

Keywords: particle crushing, mathematical modeling, size distribution density, difference scheme, particle size resistant to crushing.

Введение

Диоксиды циркония широко применимы в самых различных областях: в стекольной и керамической промышленности, при получении пленок, покрытий и различных катализаторов. Одним из самых распространенных методов получения оксидов ZrO_2 является золь-гель метод. Для синтеза наноматериалов, катализаторов необходимо получать золь-гель методом агрегативно устойчивые золи ZrO_2 , содержащие наночастицы. Поэтому в работе проведены экспериментальные исследования по получению золь-гелей ZrO_2 и изучению их агрегативной устойчивости при изменении pH в диапазоне 0.5-6. Агрегативную устойчивость золь-гелей ZrO_2 исследовали также с привлечением методов математического моделирования, термодинамики необратимых процессов, обобщенной теории ДЛФО (Дерягин, Ландау, Фервей, Овербек). Классическая теория ДЛФО обязана своему названию ученым Дерягину Б.В., Ландау Л.Д., Фервею Е и Овербеку Т. [1, 2]. Эти ученые при изучении агрегативной устойчивости пришли к выводу, что при перекрытии поверхностных слоев, окружающих частицы, связанном с уменьшением толщины прослойки между частицами, возникает расклинивающее давление – суммарный параметр, учитывающий силы притяжения и отталкивания в зоне перекрытия [1] и влияющий на агрегативную устойчивость.

В работе на основании использования экспериментальных исследований, обобщенной теории ДЛФО и применения принципа минимума производства энтропии найдены неизвестные параметры расклинивающего давления при перекрытии поверхностных слоев в системе ZrO_2 и разработан алгоритм определения размера частиц в агрегативно устойчивой системе.

Анализ состояния дел в области обобщенной теории ДЛФО.

Классическая теория агрегативной устойчивости ДЛФО [1, 2] учитывает две составляющие расклинивающего давления: молекулярную, вызванную действиями сил притяжения (Ван-дер-Ваальсовых сил) и электростатическую, учитывающую силы отталкивания, вызванные перекрытием двойных электрических слоев. Общий вид энергии взаимодействия частиц в этом случае имеет вид:

$$U_1 = U_m + U_e, \quad (1)$$

где U_m – молекулярная составляющая, Дж; U_e – электростатическая составляющая, Дж.

С развитием общей теории агрегативной устойчивости росло и количество экспериментальных данных, которые иногда противоречили классической теории ДЛФО. В данных работах [3-6] можно заметить, что на расположенных между поверхностями меньше 2-3 нм наблюдаются отклонения от классической теории ДЛФО, учитывающей влияние только Ван-дер-Ваальсовых и электростатических сил.

В работах Б.В. Дерягина и Н.В. Чураева [5-10] было высказано предположение, что существуют поверхностные силы, вследствие влияния которых структуры жидкости в перекрытии слоев сильно отличаются от ее структуры в объеме. Такие прослойки называли граничными слоями и предположили, что возникновение структурной составляющей расклинивающего давления является следствием существования данных слоев. Таким образом, суммарная энергия парного взаимодействия частиц имеет вид:

$$U_1 = U_m + U_e + U_s, \quad (2)$$

где U_s – структурная составляющая потенциальной энергии парного взаимодействия частиц, имеющая вид [9-11]:

$$U_s = \pi a K_s l^2 \exp\left(-\frac{h}{l}\right), \quad (3)$$

где a – радиус частиц, м; K_s – параметр интенсивности структурных сил; l – радиус их корреляции, h – расстояние между частицами, м.

Четких алгоритмов для выбора или расчета параметров K_s и l не существовало. В данной работе предпринята попытка создания алгоритма определения параметров K_s и l с помощью методов термодинамики необратимых процессов, а именно принципа минимума производства энтропии.

Принцип минимума производства энтропии для определения параметров структурной составляющей энергии взаимодействия частиц.

Рассмотрим процесс агрегации частиц. Математическая модель такого процесса имеет вид [12]:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \int_0^r K(\mu, r - \mu) f(\mu) f(r - \mu) d\mu - f(r) \int_0^\infty (\mu, r) f(\mu) d\mu, \quad (4)$$

$$f(t = 0, r) = f^0(r),$$

где $f(\mu)$ – плотность функции распределения частиц по размерам; r, μ – объемы частиц; t – время, с; $K(\mu, r)$ – функция, которую называют константой агрегации, м³/с; $f^0(r)$ – плотность распределения частиц в начальный момент времени.

Пусть при определенном значении rH среды через некоторое время после начального момента процесс агрегации частиц прекращается и устанавливается стационарное состояние, т.е. плотность распределения частиц по размерам не меняется с течением времени. Тогда для системы, находящейся в стационарном состоянии производство энтропии минимально, то есть выполняется принцип минимума производства энтропии И. Пригожина [12-17].

$$\min \sigma, \quad (5)$$

где σ – производство энтропии.

Производство энтропии системы, в которой происходит процесс агрегации равно:

$$\sigma = Y_{ar} X_{ar}, \quad (6)$$

где X_{ar}, Y_{ar} – термодинамические движущая сила и поток агрегации, связанные соотношением Л. Онзагера [18]:

$$Y_{ar} = L X_{ar}, \quad (7)$$

где L – феноменологический коэффициент.

В [19] движущая сила агрегации имеет вид:

$$X_{ar} = U_2 - U_1, \quad (8)$$

где U_1 определяется соотношением (2); U_2 – работа внутренних сил дисперсной системы, идущая на агрегацию частиц, которая пропорциональна кинетической энергии. Учитывая, что скорость наночастиц имеет распределение по значениям, возьмем U_2 в диапазоне $10 kT - 15 kT$.

Движущая сила агрегации X_{AG} имеет нелинейную зависимость от размеров частиц, от pH-среды, от электрокинетического потенциала, от расстояния между частицами. Расстояние между частицами играет важную роль в движущей силе агрегации. В зависимости от его значения сильно меняется составляющая U_1 движущей силы агрегации. Поэтому для выполнения требования минимума производства энтропии (5) необходимо выполнение условия:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial h} = 0$$

или

$$2LX_{ar} \frac{\partial X_{ar}}{\partial h} = 0, \quad (9)$$

Это условие (9) в свою очередь обеспечивается следующими условиями:

$$X_{ar} = U_2 - U_1 = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial X_{ar}}{\partial h} = \frac{\partial U_1}{\partial h} = 0, \quad (11)$$

Условие (11) отвечает достижению максимального значения энергии взаимодействия частиц при их сближении на расстояние h^* . То есть h^* – то расстояние, на котором $U_1(h)$ достигает своего максимума. Условие (10) свидетельствует о том, что при достижении условия $U_2 = \max U_1(h^*)$ движущая сила агрегации становится равна нулю. В этом случае система принимает стационарное состояние и размер частиц не меняется со временем, т.е. система становится агрегативно устойчивой.

Были проведены экспериментальные исследования по агрегативной устойчивости системы ZrO_2 и определены средние размеры частиц при различных pH.

Таким образом, размер частиц в соотношениях для определения U_m , U_e , U_s был известен из экспериментальных исследований. Для расчета максимума энергии взаимодействия $U_1(h)$ использовался метод золотого сечения. Параметры K_s и l для определения структурной составляющей (3) определялись методом сканирования из выполнения условий. При этом параметр K_s варьировался в интервале 10^6 - 10^9 Н/м² с шагом 10^2 , а параметр l варьировали в диапазоне 0,5-4 нм с шагом 0,1 нм.

Экспериментальные исследования по изучению агрегативной устойчивости системы ZrO_2 .

Для систем ZrO_2 проводились измерения оптической плотности при различных pH в интервале 0,5-6, на основании значений которой определялись размеры наночастиц.

Время выхода системы на стационарное устойчивое состояние соответствовало порядка 4-5 суток.

В таблице 1 представлены экспериментальные данные для системы ZrO_2 при установленном состоянии: pH, размер частиц; расчетные данные: ϕ – потенциал двойного электрического слоя частиц, λ – толщина двойного электрического слоя частиц (используемая в соотношении для определения электростатической составляющей).

Таблица 1

Данные для системы ZrO_2

pH	λ , нм	ϕ , мВ	Размер частиц, нм
0,8	0,77	4	4,3
0,9	0,86	12	5,9
1,5	1,72	18	7,5
2,04	3,21	23	7,4
2,45	5,14	35	6
3,03	10,02	30	7
3,47	16,63	25	146
4,25	40,82	18	51

Обсуждение результатов.

Для определения параметров K_s и l структурной составляющей U_s расклинивающего давления, а также для определения предельного размера частиц при агрегации на основе описанных ниже алгоритмов были написаны программные модули.

Расчеты проводились в тех областях рН, где системы сохраняли свою устойчивость и размеры частиц были постоянны (в расчетах, составляющих U_m , U_e , U_s использовались данные, представленные в таблице 1).

В таблице 2 приведены средние значения подобранных параметров интенсивности K_s и длины корреляции l для системы ZrO_2 .

Таблица 2

Значения K_s и l для системы ZrO_2								
рН	0,8	0,9	1,5	2,04	2,45	3,03	3,47	4,25
l , нм	1,6	1,3	0,9	1,1	0,9	1,3	1,4	1
$K_s \times 10^{-6}$, Дж/м ³	3,1659	4,4618	10,3808	5,8623	10,7456	3,5729	1,1456	5,4381

По значениям подобранных параметров K_s и l для разных рН были построена осредненная графическая зависимость $l = f(K_s)$, которая представлена на рис. 1.

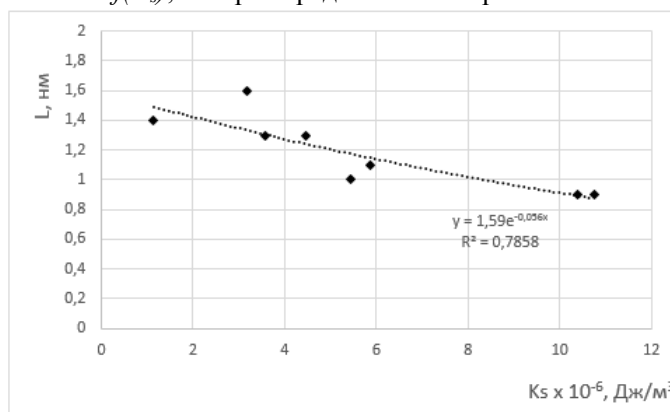


Рисунок 1 - Зависимость l от K_s для системы ZrO_2

Общий характер зависимости, представленной на рис. 1 совпадает с кривыми, которые получены в работе [20].

На рис. 2 представлены расчетные зависимости энергии взаимодействия частиц U_1 и ее составляющих при рН = 2,04. На расстоянии $h = 1$ нм энергия взаимодействия максимальна и при достижении этого значения энергии частицы отталкиваются, что делает системы агрегативно устойчивой. Рассчитано, что при рН в интервале $[0,8 - 3]$ преобладает структурная составляющая в энергии взаимодействия, и система ZrO_2 становится агрегативно устойчивой, что хорошо согласовывается с экспериментальными данными.

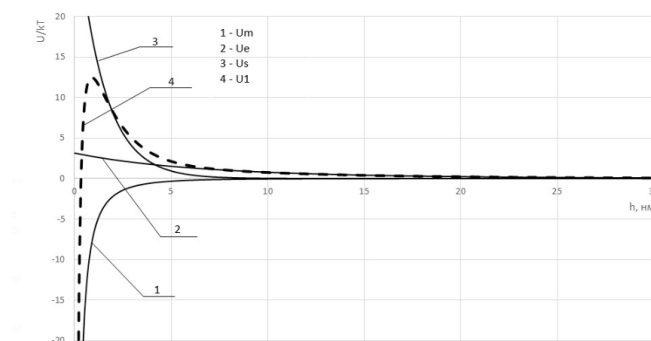


Рисунок 2 - Кривые энергий взаимодействия при рН = 2 ($l = 1,1$ нм; $K_s = 5,862 \times 10^6$ Дж/м³)

Закключение.

В работе было продемонстрировано развитие теории ДЛФО на основе исследования методов термодинамики необратимых процессов, а именно использование принципа минимума производства энтропии. На основании принципа минимума производства энтропии были построены алгоритмы определения параметров структурной составляющей расклинивающего давления, а также предельного размера частиц в агрегативно устойчивой системе.

Было определены значения параметров K_s и l структурной составляющей расклинивающего давления в системе ZrO_2 . Была найдена корреляция между параметрами K_s и l и построены графические зависимости K_s от l .

Определены составляющие энергии взаимодействия между частицами U_1 в интервале изменения pH [0,8 – 4]. Показано, что система агрегативно устойчива в интервале изменения pH [0,8 – 3].

Список литературы

1. Дерягин Б. В., Ландау Л. Д. Теория устойчивости сильно заряженных лиофобных золь и слипания сильно заряженных частиц в растворах электролитов // ЖЭТФ. 1941. Т. 11. №. 2. С. 802.
2. Verwey E. J. W., Overbeek J. T. G. Theory of the stability of lyophobic colloids // Journal of Colloid Science. 1955. Vol. 10. №. 2. P. 224-225.
3. Bhattacharjee S., Elimelech M., Borkovec M. DLVO Interaction between colloidal particles: beyond Derjaguin's approximation // Croatica Chemica Acta. 1998. Vol. 71. №4. P. 883-903.
4. Boström M., Deniz V., Franks G.V., Ninham B.V. Extended DLVO theory: Electrostatic and non-electrostatic forces in oxide suspensions // Chemical Advances in Colloid and Interface Science. 2006. Vol. 123–126. P. 5-15.
5. Derjaguin B. V., Churaev N. V. Structural component of disjoining pressure of thin layers of liquids. // Croat. Chem. Acta. 1977. V. 50, № 1-4. P. 187.
6. Чураев Н.В. Поверхностные силы и физикохимия поверхностных явлений // Успехи химии. 2004. Т. 71, № 1. С. 25-38.
7. Дерягин Б.В. Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок. М.: Наука, 1986. С. 206
8. Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. М.: Наука, 1985. С. 220
9. Дерягин Б.В. Устойчивость коллоидных систем // Успехи химии. 1979. Т. 48, № 4. С.675-721.
10. Чураев Н.И. Включение структурных сил в теорию устойчивости коллоидов и пленок // Коллоидный журнал. 1984. Т. 46., № 2. С. 303-313.
11. Голикова Е.В. Роль граничных слоев воды в устойчивости дисперсных систем. Дисс. ... докт. хим. наук. С.-Пб.: 2004. С. 436.
12. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Кольцова Э.М. Системный анализ процессов химической технологии: массовая кристаллизация. – 2-е изд. – М. – Издательство Юрайт, 2018. – С. 368.
13. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. УРСС. – 2014. – С. 304.
14. Пригожин И. От существующего к возникающему. – УРСС, 2006. – С. 291.
15. Гленсдорф П., Пригожин И. Р. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. – УРСС, 2003. – С. 280.
16. Кольцова, Э.М., Гордеев Л.С. Синергетика в химии и химической технологии. – 2-е изд. – М. – Издательство Юрайт, 2018. – С. 295.
17. Кольцова Э.М., Третьяков Ю.Д., Гордеев Л.С. Нелинейная динамика и термодинамика необратимых процессов в химии и химической технологии. – М. – Химия, 2001.
18. Гроот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика. – М. – Издательство Мир, 1964. – С. 456.
19. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Кольцова, Э.М. Системный анализ процессов химической технологии: методы неравновесной термодинамики. – М. – Издательство Юрайт, 2018. – С. 367.
20. Новикова Н.А. Кинетика коагуляции золя монодисперсного кремнезема в растворах электролитов // дисс. ... канд. хим. наук. С.-Пб., 2016. С. 143.

УДК 532.546

Вязьмин А.В., Шумова Н.В., Королёв Е.К., Христюбова Е.Г.

Некоторые методы и подходы к аппаратурному оформлению процесса объемного культивирования живых микроорганизмов в геле.

Вязьмин Андрей Валентинович – д.ф.-м.н., заведующий кафедрой ПАХТ им. Н.И. Гельперина;

Шумова Надежда Вадимовна – к.т.н., donatra@yandex.ru, доцент кафедры ПАХТ им. Н.И.

Гельперина;

Королёв Егор Константинович – аспирант кафедры ПАХТ им. Н.И. Гельперина;

Христюбова Елизавета Геннадьевна – магистр кафедры ПАХТ им. Н.И. Гельперина;

ФГБОУ ВО "МИРЭА - Российский технологический университет",

Россия, Москва, 119454, Проспект Вернадского, д. 78.

Рассмотрены методы обеспечения живых микроорганизмов питательными веществами и кислородом при их культивировании в объеме гидрогелей. Предложены некоторые подходы к аппаратурному оформлению процесса объемного культивирования клеток за счет создания сети разветвлённых каналов для подачи кислорода и отвода углекислого газа в гидрогелевом внеклеточном матриксе.

Ключевые слова: 3D – биопечать, искусственные каналы, гидрогели, подвод кислорода к клеткам.

Some methods and approaches to hardware design process of volumetric cultivation living microorganisms in a gel.

Vyazmin A.V., Shumova N.V., Korolev E.K., Khristolyubova E.G.

MIREA – Russian technological university, Moscow, Russian Federation.

Reviewed the methods providing living microorganisms nutrients and oxygen during their cultivation in volume hydrogels. Some approaches to hardware design of the volumetric cell culture process by creating a network branched channels for oxygen supply and carbon dioxide removal in a hydrogel extracellular matrix.

Key words: 3D – bioprinting, artificial channels, hydrogels, oxygen supply to cells.

Введение

Технологии 3D – биопечати позволяют из донорских или стволовых клеток искусственно создавать органы и ткани для нужд регенеративной медицины [1]. При создании биочернил и подложки для их нанесения в аддитивных технологиях широко применяют гели, в частности, природные гидрогели на основе агарозы, коллагена, желатина, гиалуроновой кислоты и др. [2]. При реализации 3D – биопечати необходимо обеспечить три принципиальные стадии технологического процесса (рис. 1).

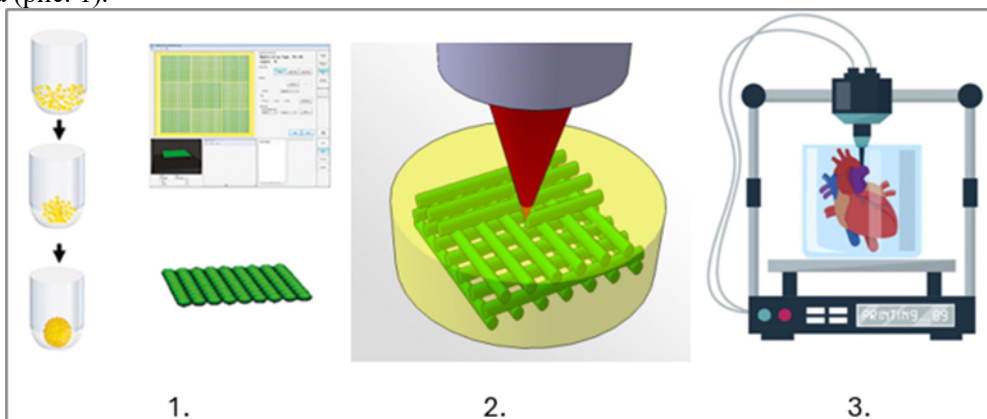


Рисунок 1 - Технологические стадии процесса 3D - биопечати: 1 — стадия подготовки, на ней происходит подбор материалов, изготовление биочернил и скаффолдов, моделирования печатаемого биообъекта; 2 — стадия изготовления, на ней производится печать органа или ткани на 3D - биопринтере; 3 — стадия постпринтинга, на которой реализуется доращивание напечатанного биообъекта.

Основные сложности при реализации технологии 3D-биопечати, возникают на последней – третьей стадии. Использование природных гидрогелей для инкапсуляции клеток и изготовления

подложек для формирования печатаемой биоконструкции, позволяет предохранить клетки от механических повреждений и обеспечить им внеклеточный матрикс по своим свойствам схожий с природным внеклеточным веществом [3]. Однако, недостаточная массопроводность гидрогелей не позволяет обеспечить все клетки необходимым питанием и кислородом, а также реализовать отвод продуктов их метаболизма из объема гидрогелевого матрикса.

Эксперимент

Исследования динамики роста клеток, инкапсулированных в объеме агарного геля, при подаче питания только через его внешнюю границу показали, что собственных массопроводных свойств геля недостаточно для обеспечения питательной средой клеток по всему объему гелевого матрикса [4]. Для непрерывной подачи питательной среды в объем гидрогеля с инкапсулированными клетками ранее был предложен метод создания в нем проточных вертикальных каналов [5]. Такой метод может быть пригоден не только для реализации аэробного дыхания клеток, инкубированных в объеме гидрогеля, но и для отвода от них продуктов метаболизма, например, углекислого газа.

Экспериментально было выполнено сравнение динамики роста клеток дрожжевой культуры *Pichia polymorpha* Y-314, при разных условиях заполнения канала. В эксперименте использовали образцы агарозного геля с концентрацией 0,6 масс. % и концентрацией клеток дрожжей 0,04 г/л. Все образцы агарозных гелей были приготовлены на смеси питательной среды с дистиллированной водой в соотношении 33/66. Эксперимент проводился при температуре 36 °С в течение 72 часов. Динамика роста клеток оценивалась в следующих образцах:

- без канала,
- с пустым каналом,
- при подаче в канал питательной среды,
- при подаче в канал перфторана насыщенного кислородом.

Перфторан – кровезаменитель с газотранспортной функцией, обладающий особыми гемодинамическими и реологическими свойствами [6]. Динамика роста клеток и выделения углекислого газа в образце агарозного гидрогеля с клетками при подаче в канал перфторана приведена на рис. 2.

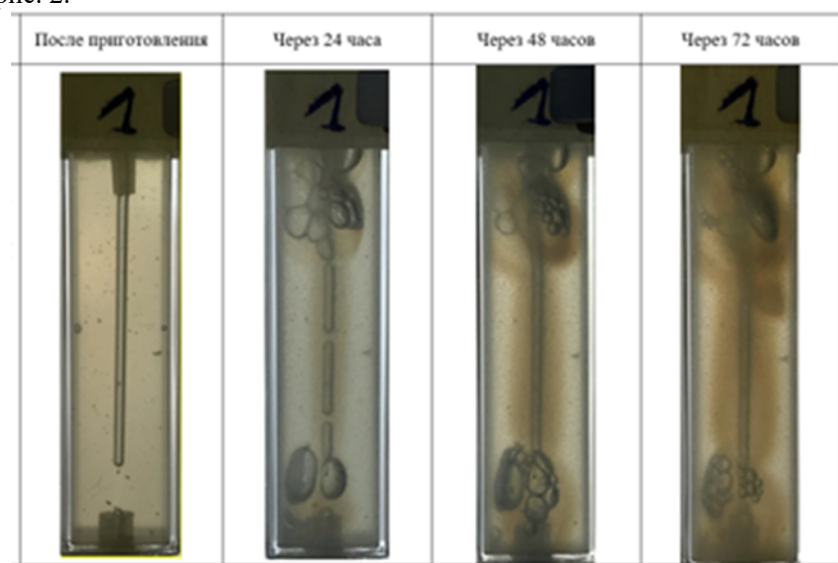


Рисунок 2 - Фотографий образца агарозного гидрогеля с инкапсулированными клетками дрожжей при подаче в канал перфторана в различные временные моменты. Затемнения – область интенсивного роста концентрации клеток, пузыри – выделение углекислого газа (продукта метаболизма клеток).

Измерение концентраций клеток во всех образцах проводили спектрометрическим методом по изменению интенсивности пропускания на длине волны 540 нм (обычно используемой в микробиологии) образцом. Результаты измерения в относительных единицах пропускания света образцами. (Таблица 1).

Таблица 1

Динамика роста клеток при различных способах заполнения канала.

Время, ч	Относительная интенсивность пропускания света через образец агарозного геля с клетками, %			
	Без канала	Пустой канал	При подаче питательной средой	При подаче перфторана
0	100	100	100	100
24	38,5	46,0	33,6	25,3
48	36,2	16,3	21,1	9,0
72	35,6	13,6	20,9	9,8

Эксперимент подтвердил эффективность использования перфторана для обеспечения клеток кислородом при их культивировании в объеме гидрогеля с использованием внутреннего непроточного каналов.

Создание проточных каналов в геле должно учитывать две принципиальные особенности. Во-первых, крайне желательно, чтобы они были ветвящиеся и качественно имитировали кровеносную систему. Во-вторых, ток жидкости в каналах должен быть направлен снизу-вверх, чтобы возникающие микропузыри углекислого газа уносились жидким потоком. Для создание таких разветвленных каналов предложен метод, в котором структуру сети формируют с помощью гибких нитей (фитилей). Для подтверждения возможности обеспечения дыхательных процессов клеток в гидрогелях при использовании фитилей проведен специальный эксперимент.

Клетки дрожжевой культура *Pichia polymorpha* Y-314 относятся к группе факультативно-анаэробных микроорганизмов, то есть могут переключаться как на аэробное, так и на анаэробное дыхание в зависимости от условий среды [7]. В присутствии кислорода дрожжи переключаются на аэробное дыхание, при котором образуется в два раза больше биомассы и синтезируется значительно больше АТФ – аденозинтрифосфат. Суть эксперимента заключалась в сравнительном культивировании клеток дрожжей при условиях подачи кислорода только через внешнюю границу геля или под действием капиллярных сил по искусственному фитилю, проходящему через гель. Для этого исследуемые образцы геля изготавливались двухслойными, нижний слой содержал клетки дрожжей, верхний чистый гель. Для приготовления образцов выбран смесевой агарозно-желатиновый гель, приготовленный на специальном бульоне, предназначенного для питания выбранного штамма дрожжей. Добавление желатина в агарозный гель позволяет моделировать тиксотропные свойства, например, использование желатина при формировании гетерофазной системы показало, что после прохождения через сопло экструдера первоначальная вязкость системы быстро восстанавливалась [8]. Инкубирование дрожжей, сопровождающееся ростом концентрации клеток, проводили в спектрометрической кювете в течение двух суток при температуре 26 °С. Временная динамика изменения внешнего вида образцов с ростом концентрации клеток приведена на рис. 3.

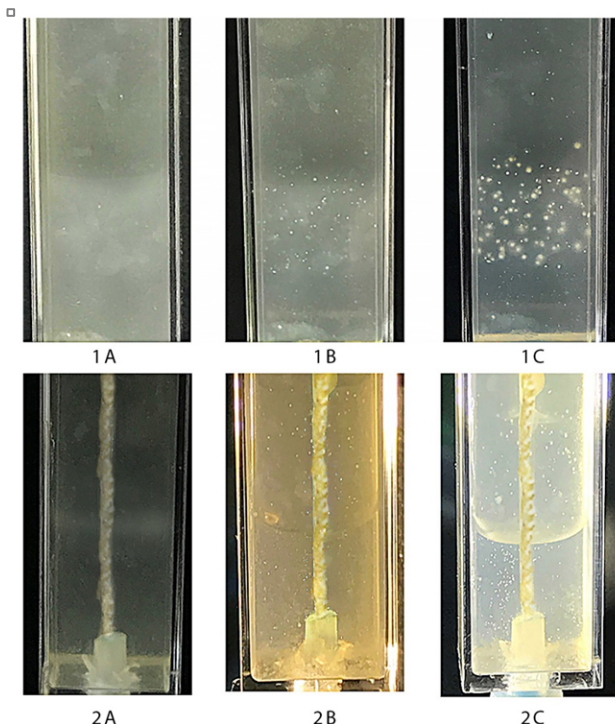


Рисунок 3 - Фотографий изменения внешнего вида образцов со временем: 1 – агарозно-желатиновый гель с клетками при подаче кислорода через внешнюю границу, 2 – агарозно-желатиновый гель с клетками при подаче кислорода по фитилю. Моменты времени фотосъемки: а – после приготовления; б – через 24 часа; в – через 48 часов.

Увеличение концентрации клеток измеряли и оценивали неинвазивно спектрометрическим методом по относительной интенсивности пропускания света на длине волны 540 нм образцом из чистого геля и геля с клетками по отношению к первоначальному пропусканию света соответствующим образцом, принятым за 100 % (рис. 4 - 5.).

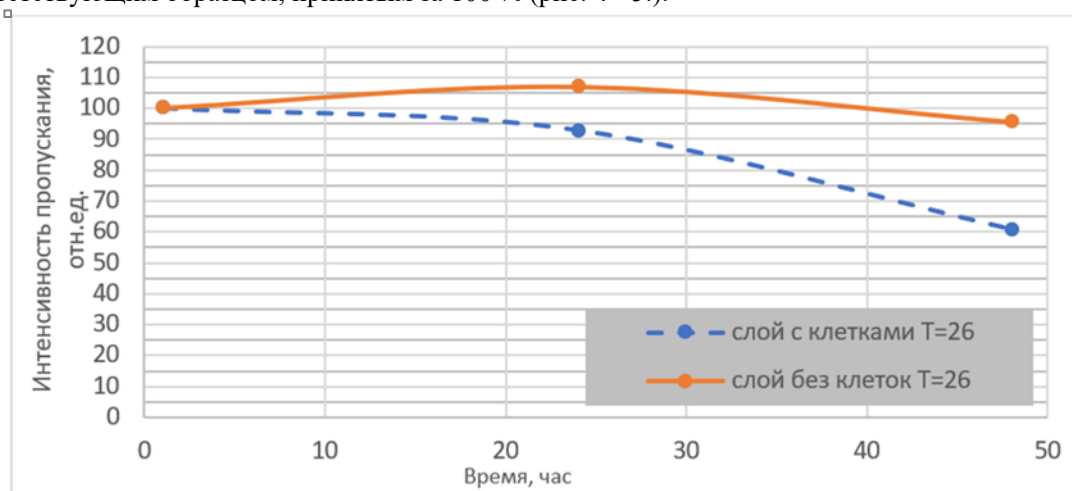


Рисунок 4 - Зависимости интенсивности пропускания света на длине волны 540 нм от времени в слое с клетками и без клеток в агарозно-желатиновом геле без фитиля.

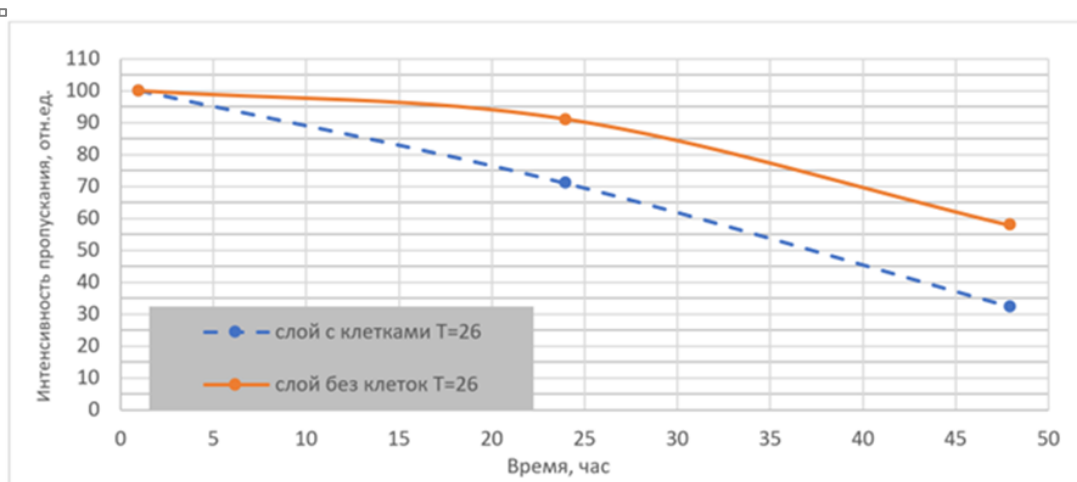
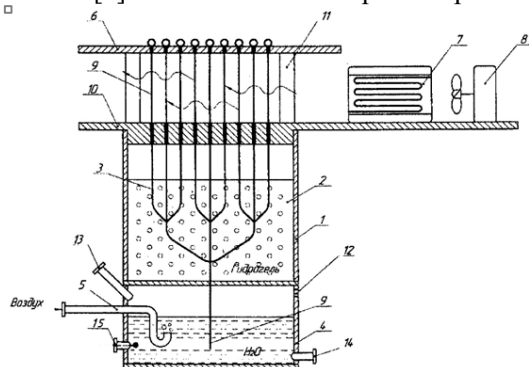
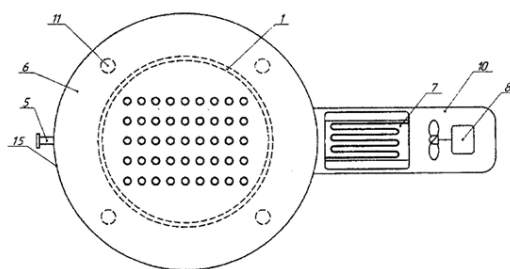


Рисунок 5 - Зависимости интенсивности пропускания света на длине волны 540 нм от времени в слое с клетками и без клеток в агарозно-желатиновом геле с фитилем.

Анализ результатов показал, что при подаче по фитилю насыщенной кислородом воды, изменение концентрации клеток происходило в обоих слоях гидрогеля. Причем изменения оптической проницаемости в слое, изначально содержавшем клетки, уменьшалось со 100 % до 33 %, тогда как в образце без фитиля интенсивность пропускания света падала со 100 % до 60 %. Исходя из экспериментальных данных для представленных методов подачи кислорода в объем гидрогелиевого матрикса по искусственно созданным каналам предложен и запатентован аппарат для культивирования аэробных клеток [9]. Схема такого аппарата на рис. 6.



Фиг. 1



Фиг. 2

Рисунок 6 - Схема аппарата для объемного культивирования клеток в гидрогеле, фиг.1 – фронтальный вид, фиг. 2 – вид сверху. Здесь: 1 - корпус аппарата, 2 - гидрогель с клетками, 3 - ветвящиеся микроканалы, 4 - ёмкость с водой, 5 - барботёр, 6 - держатель для закрепления фитиля, 7 - калорифер, 8 - вентилятор, 9 - ветвящийся фитиль, 10 - крышка, 11 - стойка для держателя, 12- отверстие для отвода воздуха, 13 и 14 - штуцера для залива и слива, соответственно, 15- штуцер для прибора контроля концентрации кислорода.

В рабочем объеме аппарата, заполненным гидрогелем с иммобилизованными живыми клетками, создана сеть разветвленных микроканалов с расположенным в них фитилем, по которому под действием Лапласовых сил можно непрерывно подводить кислород к клеткам и отводить из гидрогелиевого матрикса углекислый газ, образованный в результате их жизнедеятельности.

Заключение

Проведено экспериментальное исследование роста клеток дрожжей при их культивировании в объеме гидрогелей. Предложены способы подвода кислорода к клеткам, иммобилизованным в объеме геля, за счет создания внутреннего канала с подачей по нему заменителя крови – перфторана, а также при использовании фитиля, выполняющего функцию капиллярного насоса. Схематически представлен один из вариантов оформления процесса объемного культивирования аэробных микроорганизмов.

Список литературы

1. Хесуани, Ю. Дж. Введение в 3D-биопринтинг: история формирования направления, принципы и этапы биопечати / Ю. Дж. Хесусни, Н. С. Сергеева, В. А. Миронов, А. Г. Мустафин, А. Д. Каприн // Гены & Клетки. – 2018. – Т. XIII, № 3. – С. 38-45.
2. Merceron, T. K. Hydrogels for 3D bioprinting applications / T. K. Merceron, S. V. Murphy // Essentials of 3D Biofabrication and Translation. – 2015. – P. 249-270.
3. Lee, K. Y. Hydrogels for Tissue Engineering / K. Y. Lee, D. J. Mooney // Chemical Reviews. – 2001. – V. 101. – P. 1869-1880.
4. Pokusaev, B. G. Microorganisms growth in gel volume: process dynamics in limiting mass transfer conditions / B. G. Pokusaev, A. V. Vyazmin, D. A. Nekrasov, N. S. Zakharov, D. P. Khramtsov, N. V. Shumova, D. A. Belova // Chemical Engineering Transactions. – 2020. – V. 79. – P. 13-18.
5. Pokusaev, B. G. Approaches to mass transfer modeling in micro-channels inside gel / B. G. Pokusaev, A. V. Vyazmin, D. A. Nekrasov, N. S. Zakharov, D. P. Khramtsov, N. V. Shumova // Bulgarian Chemical Communications. – 2020. – V. 52. – P. 68-73.
6. Крылов, Н. Н. В поисках идеального кровезаменителя. Создание и применение перфторана / Н. Н. Крылов, А. Ю. Кажлаев, И. В. Карпенко, С. Д. Батоев // Хирургия. Журнал им. Н. И. Пирогова. – 2024. – Т. 2. – С. 111-117.
7. Котенко, С. Ц. Ферментативная активность и морфологические особенности дрожжей *saccharomyces cerevisiae* γ -503 при культивировании в аэробных и анаэробных условиях / С. Ц. Котенко, Э. А. Исламмагомедова, Э. А. Халилова // Юг России: экология, развитие. – 2010. – Т. 5(1). – С.12-16.
8. Menshutina, N. Investigation of the 3D printing process utilizing a heterophase system / N. Menshutina, A. Abramov, M. Okisheva, P. Tsygankov // Gels. – 2023. – V. 9, № 7. – P. 2-15.
9. Вязьмин, А.В. Аппарат для объемного инкубирования клеток / А. В. Вязьмин, Н. В. Шумова, М. Г. Лагуткин, И. Ю. Голованов // Пат. 2805366 РФ. - 2023.

УДК 66.074.2.

Ганиева С.У., Худойбердиева Н.Ш., Сагитов А.М., Нурмухамедов Х.С., Каюмов А.А.

Влияние отношения жидкости к газовой фазе на гидравлическое сопротивление вихревого циклона

Ганиева Сабохат Уктамовна. Аспирант. Saboxatganiyeva981@gmail.com

Худойбердиева Н.Ш. PhD, доцент, Навоийский горно-металлургический университет, г.Навои.

Сагитов А.М. к.т.н., доцент, ТашХТИ, г.Ташкент. ул. Мирзо Улугбек, дом 41.

Нурмухамедов Х.С. д.т.н., проф. ТашХТИ, г.Ташкент, ул. Мирзо Улугбек, дом 41.

Каюмов А.А. ассистент, ТашХТИ, г.Ташкент, ул. Мирзо Улугбек, дом 41.

В тезисе рассмотрены мокрая очистка как эффективный, но часто недооцененный метод борьбы с загрязнением воздуха при переработке природного газа, а также очистке газовых неоднородных систем. Анализируются ключевые преимущества мокрых скрубберов перед традиционными методами очистки, включая их способность значительно снижать выбросы загрязняющих веществ. Особое внимание уделено недостаткам противоточных циклонов, связанным с выбросом мелкодисперсных частиц, а также возможным методам повышения эффективности центробежного пылеулавливания. Дополнительно рассматривается влияние конструктивных и режимных параметров вихревых пылегазоразделителей на эффективность очистки, что позволяет улучшить улавливание твердых частиц размером 3–5 мкм. Описана экспериментальная установка для очистки газовой электромагнитной системы, использующая влажный циклон с тангенциальным вводом газа и жидкости. Конструкция установки включает круглый стеклянный корпус, обеспечивающий высокий уровень турбулентности при распылении воды на мельчайшие капли. Результаты исследований показали, что гидравлическое сопротивление увеличивается с ростом соотношения расхода жидкой фазы к газовой (L/G) и скорости газового потока. При 3 м/с и L/G=1:1 оно составило 23 Па, а при 10 м/с – 90 Па. Параллельный ввод фаз оказался более эффективным, обеспечивая лучшее гидравлическое сопротивление по сравнению с раздельным вводом, что подтверждает высокую производительность установки при умеренных энергозатратах.

Ключевые слова: запыленный газ, очистка, вихревой циклон, гидравлическое сопротивление.

Effect of Liquid to Gas Ratio on Hydraulic Resistance of Vortex Cyclone

Ganieva S.U.¹, Khudoiberdieva N.Sh.¹, Sagitov A.M.², Nurmukhamedov Kh.S.², Kayumov A.A.²

¹ Navoi Mining and Metallurgical University, Navoi. Uzbekistan

² Tashkent Institute of Chemical Technology, Tashkent, Uzbekistan.

The these discusses wet scrubbing as an effective but underestimated method of combating air pollution in natural gas processing and cleaning gas heterogeneous systems. The advantages of wet scrubbers over traditional cleaning methods, as well as their role in reducing pollutant emissions, are analyzed. Particular attention is paid to the disadvantages of counter-current cyclones associated with the emission of fine particles, and possible methods for increasing the efficiency of centrifugal dust collection. The influence of the design and operating parameters of vortex dust and gas separators on the cleaning efficiency is considered, which allows improving the collection of solid particles of 3-5 μm in size. The article describes an experimental setup for cleaning a gas electromagnetic system using a wet cyclone with tangential gas and liquid inlet. The setup has a round glass body and provides high turbulence when spraying water into tiny droplets. The research results showed that hydraulic resistance increases with an increase in the liquid to gas flow ratio (L/G) and the gas flow rate. At a speed of 3 m/s and L/G=1:1, the hydraulic resistance was 23 Pa, and at 10 m/s — 90 Pa. Parallel input of phases proved to be more effective, providing better hydraulic resistance compared to separate input. The results indicate high plant productivity with moderate energy consumption.

Keywords: dusty gas, cleaning, vortex cyclone, hydraulic resistance.

Введение

Мокрая очистка в технологиях переработки природного газа и очистки газовых неоднородных систем зачастую недооцененный метод борьбы с загрязнением воздуха. Независимо от того, является ли причиной нежелание отказываться от хорошо известных, типичных методов очистки или просто незнание того, что эта технология доступна для применения, мокрая очистка, как правило, не входит в перечень оборудования инженеров или технологического персонала для очистки газовых выбросов.

Универсальная технология мокрой очистки и соответствующий данному процессу мокрые скрубберы является не только альтернативой более традиционному оборудованию для борьбы с загрязнением окружающей среды, но и в некоторых случаях наилучшим вариантом.

На некоторых промышленных предприятиях газовые выбросы выбрасываются в атмосферу при помощи высотных труб, для снижения концентрации путем рассеивания в окружающую среду [1, 2, 3]. Для очистки газовых выбросов и технологических газов используются сухие и мокрые пылеуловители. Анализ эксплуатации противоточных циклонов выявил из-за сложной аэродинамики закрученного потока в контактной зоне циклонов происходит выброс мелкодисперсных, а иногда и среднedisперсных фракций восходящим закрученным потоком в выхлопную трубу [4-5]. Поникаров И.И. с сотрудниками предлагают пути повышения эффективности центробежного пылеулавливания, которая позволит улавливать мелкодисперсную фракцию пыли с размерами твердых частиц более 3-5 мкм [6]. Эффективность очистки газовых неоднородных систем во входной зоне вихревого пылегазоразделителя зависит от конструктивных, режимных и физико-химических свойств пыли и газа. Особенно высота входной зоны вихревого пылегазоразделителя зависит распределение тангенциальной и осевой составляющих скорости движения смеси в аппарате [7].

Степень пылеулавливания η во входной зоне пылегазоразделителя предложено определить по формуле:

$$\eta = 1 - \frac{C}{C_0} = 1 - \exp \left[\frac{-4V_{ц.ос} \cdot h_{вх}}{D_3 \cdot V_{х.ср}} \right] \quad (1)$$

где $V_{ц.ос}$ - скорость центробежного осаждения твердых частиц; $V_{х.ср} = G_v/F_k$ - среднерасходная скорость движения пылегазовой смеси, м/с; D_3 - эквивалентный диаметр кольцевого канала, м.

Из формулы (1) следует, что увеличение высоты входной зоны $h_{вх}$ позволяет увеличить эффективность пылеулавливания в вихревых пылегазоразделителях. Также, увеличение скорости центробежного осаждения положительно влияет на эффективность пылеулавливания.

Шевляков Ф.Б. и др. разработали способ очистки природного или попутного нефтяного газа от сероводорода методом хемосорбции в условиях высокоразвитой поверхности, создаваемый трубчатым турбулентным аппаратом. Данный метод позволяет снизить содержание сероводорода до массовой концентрации не более 0,003 г/м³ [8]. В качестве поглотителя сероводорода использована товарная форма реагента на основе формальдегида.

Создан способ и множество конструкций вихревых аппаратов на основе противоточного движения потоков, закрученных в одну сторону и движущихся во встречных направлениях [9, 10].

На основе уравнения энергетического баланса потоков получена расчетная зависимость для определения гидравлического сопротивления ΔP и коэффициента гидравлического сопротивления ξ группового прямооточного вихревого пылеуловителя [11, 12]:

$$\Delta P = 0,33 \cdot \left[(\Delta P_1' + \Delta P_1'') \cdot k + (\Delta P_2' + \Delta P_2'') \cdot (1 - k) \right] \quad (2)$$

где $\Delta P_1', \Delta P_1'', \Delta P_2', \Delta P_2''$ – потери полного давления, соответственно периферийных и центральных потоков запыленного газа в каждой из цилиндрических обечайек; $k = Q_1/Q_0$ - кратность расходов; Q_1, Q_0 - объемные расходы запыленного газа, подаваемого через периферийные и центральные патрубки, м³/с; $Q_0 = Q_1 + Q_2$ - общий объемный расход запыленного газа через аппарат, м³/с.

$$\xi = 0,5 \cdot \left[(\xi_1' + \xi_1'') \cdot k^2 + (\xi_2' + \xi_2'') \cdot (1 - k)^2 \right] \quad (3)$$

где $\Delta \xi_1', \Delta \xi_1''$ – коэффициенты гидравлического сопротивления аппарата при подаче запыленного газа только в периферийные потоки каждой цилиндрической обечайки; $\Delta \xi_2', \Delta \xi_2''$ – коэффициенты гидравлического сопротивления аппарата при подаче запыленного газа только в центральные потоки каждой цилиндрической обечайки.

В работе Халитова Р.А. и др. представлена конструкция мокрого пылеуловителя и результаты экспериментального исследования гидродинамических характеристик модели вихревого пылеуловителя. Проведенные исследования показали, что вихревой аппарат работоспособен в широком диапазоне изменения нагрузок по газовой и жидкой фазе, обладает брызгоуносом в допустимых пределах, высокой объемной концентрацией по жидкой фазе и невысоким гидравлическим сопротивлением [13, 14]. В Работе Хамидуллиной Н.А. и др. в камеру аппарата по касательной вводят и газ, и жидкость. Из щелей завихрителя выходит в большом количества в виде струй газожидкостной слой [15]. На стенках корпус аппарата оседают жидкость с частицами, а через

центральный патрубок газовый поток выходит из аппарата. Стекающую на наклонную тарелку жидкость выводится из аппарата самотеком.

Экспериментальная часть

Экспериментальная установка для очистки газовой неоднородной системы из мокрого циклона м тангенциальным вводом как газовой, так и жидкой фаз. Корпус аппарата цилиндрической формы, стеклянный – диаметр $D=0,078$ м, высота $H=1,49$ м. Кроме вихревого циклона установка состоит из линии подачи газовой и жидкой фаз, включающие соответственно турбогазодувку и насос, устройства и аппараты для измерения гидравлического сопротивления, расхода и температуры. В качестве газовой фазы использован воздух, а жидкой – вода. Причем, ввод газовой и жидкой фазы тангенциальный, движутся параллельно, сверху вниз. Вывод газовой и жидкой фаз осуществляется из нижней части корпуса, где для сбора жидкой фазы с твердыми частицами предусмотрена емкость объемом. В целях получения турбулизированного потока с высокой степенью турбулентности, жидкая фаза распыляется на мельчайшие капли с высокой скоростью. В результате газожидкостной поток с твердой фазой приобретает вращательно-поступательное движение.

В качестве твердой фазы использовали фракции желтого песка с диаметром частиц 45, 63, 125 и 250 мкм.

Исследования по гидравлическому сопротивлению вихревого циклона от соотношения расхода жидкой фазы к газовой представлены в виде зависимости ΔP от L/G (рис.1).

Исследования по гидравлическому сопротивлению вихревого гидроциклона от соотношения расхода жидкой фазы к газовой L/G при различных скоростях газовой фазы показали, что функция $\Delta P=f(L/G)$ имеет плавно восходящий характер для скоростей газовой фазы (рис.1). При соотношении жидкой L фазы к газовой G фазе равной $L/G=1:1$ и скорости газового потока $w=3$ м/с значение гидравлического сопротивления $\Delta P=23$ Па при $L/G=1:1$, при $L/G=1:3$ с величина $\Delta P=27$ Па, при $L/G=1:5$ величина $\Delta P=30$ Па и соответственно при $L/G=1:9$ $\Delta P=36$ Па.

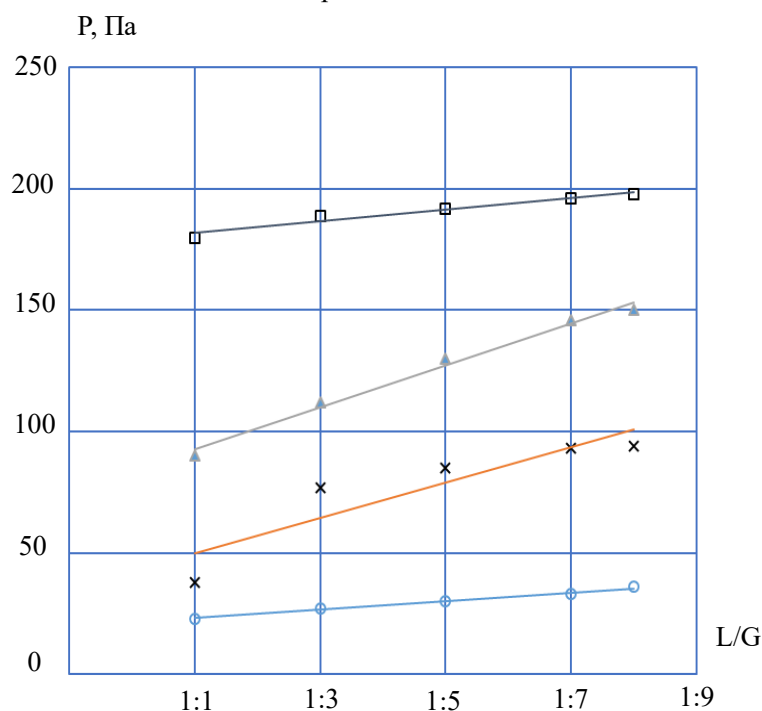


Рисунок 1 - Гидравлическое сопротивление вихревого циклона с параллельным вводом жидкой и газовой фаз. ○ – $w=3$ м/с; × – $w=5$ м/с; ▲ - $w=10$ м/с; □ - $w=15$ м/с.

Аналогичный рост гидравлического сопротивления наблюдается и при других значениях соотношения скоростей газового потока. Разница только в численных значениях, которые увеличиваются с ростом соотношения до $L/G=1:9$.

При скорости газового потока $w=10$ м/с значение гидравлического сопротивления при $L/G=1:1$ равно $\Delta P=90$ Па, при $L/G=1:3$ с величина $\Delta P=112$ Па, при $L/G=1:5$ величина $\Delta P=130$ Па и

соответственно при $L/G=1:9$ - $\Delta P=150$ Па. Видно, что повышение скорости газовой фазы с 3 до 10 м/с приводит к увеличению гидравлического сопротивления в 4 раза.

Заключение

Отличительная особенность предлагаемой конструкции в том, что она обеспечивает высокие скорости, приводящие к интенсивному перемешиванию, и способствуют росту турбулентности потока.

Сравнение гидравлического сопротивления предлагаемого метода с другими аналогичными конструкциями циклонов показало, что параллельный ввод через один тангенциальный ввод более предпочтителен относительно раздельного противоточного ввода газовой и жидкой фаз в 1,5-2,5 раза.

Относительно низкое гидравлическое и высокая степень турбулентности приводит к росту производительности аппарата при умеренных энергетических затратах на организацию эффективной очистки газовой неоднородной системы.

Список литературы

1. Нурмухамедов Х.С., Закиров С.Г., Юсупбеков Н.Р. ва б. Газларни қайта ишлаш технологияси, жараён ва қурилмалари. – Тошкент: Шарқ, 2015. – 848 б.
2. Татаринев Е.Б. Аэрогидродинамика и пылеулавливание в вихревом аппарате с оросителем в закручивающем устройстве / Автореф. дисс...к.т.н., Казань, 2002. – 20 с.
3. Алексеенко С.В., Окулов В.Л. Закрученные потоки в технических приложениях (обзор) // Теплофизика и аэромеханика, 1996. – т.3.-№2.-С.101-138.
4. Huang L., Deng S., Chen Z., Guan J., Chen M.. Numerical analysis of a novel gas-liquid pre-separation cyclone. // Separation and Purification Technology. 2018. V. 194. P. 470-479.
5. Ehteram M.A., Tabrizi H.B., Mesbah M., Ahmadi G., Mirsalim M.A. Experimental study on the effect of connecting ducts on demisting cyclone efficiency // Exp. Therm. Fluid Sci. 2012. V. 39. P. 26-36.
6. Алексеев В.В., Поникаров И.И., Алексеев П.В. Анализ гидравлического сопротивления и расчет противоточных циклонов и вихревых камер // Вестник Казан.технол.ун-та, 2014. – т.17. - №2.- С.132-134.
7. Кера А. The efficiency improvement of a largediameter cyclone – the CFD calculations // Sep. Purif. Technol. 2013. V. 118. P. 105-111.
8. Шевляков Ф.Б., Литвяков И.С., Мирсаяпова И.Р. Очистка углеводородных природных газов от сероводорода в трубчатом турбулентном аппарате // Нефтегазовое дело, 2023. - №6. – с.34-56.
9. Клепча О.С., Акулич А.В., Лустенков В.М. Сравнение прямоточных и противоточных вихревых пылеуловителей // Техника и технология пищевых производств / Тез.докл. X-ой Межд.науч. конф. студентов и аспирантов. – Могилев:Могил.гос.ун-т продовольствия, 2016. – 256 с.
10. Патент РФ № 1466795. Вихревой пылеуловитель. / Б.С.Сажин, Б.П.Лукачевский, А.В.Акулич, А.И.Буяров и др. // Открытия. Изобретения. – 1989. – Бюл.№11. – 28 с.
11. Акулич А.В., Лустенков В.М. и др. Разработка прямоточного пылеуловителя и исследование его гидравлического сопротивления // Техника и технология пищевых производств / Тез.докл. XII-ой Межд.науч. конф. студентов и аспирантов. – Могилев: Могил.гос.ун-т продовольствия, 2018. – с.10-11.
12. Акулич А.В., Барсуков В.В., Хурсин М.В. и др. Исследование эффективности улавливания группового прямоточного пылеуловителя на основе взаимодействующих закрученных потоков // Образование, наука и производство в XXI веке: современные тенденции развития. Материалы межд.конф. – Могилев: Белорус-Росс. ун-т, 2018. – с.151-152.
13. Халитов Р.А., Махоткин И.А., Пензин Ю.В. и др. Исследование гидродинамических характеристик вихревого аппарата / Вестник технологического университета, 2017. - т.20. - №4. – С.57-60.
14. Bernardo S., Mori M., Peres A.P., Dionísio R.P. 3-D computational fluid dynamics for gas and gas-particle flows in a cyclone with different inlet section angles // Powder Technol. 2006. V. 162. P.190-200.
15. Pei B., Yang L., Dong K., Jiang Y., Du X., Wang B. The effect of cross-shaped vortex finder on the performance of cyclone separator // Powder Technol. 2017. V.313. P. 135-144.

УДК 66.045.124

Ганижонов Д.И., Исмаилов О.Ю.

Изучение влияния гидродинамических параметров сырьевых потоков на тепловую эффективность

Ганижонов Дониёр Иброхим угли – Независимый исследователь doniyorofficial1996@gmail.com

Гулистанский государственный университет. Узбекистан Гулистан

Исмаилов Ойбек Юлибаевич – д.т.н., доцент кафедры;

Институт общей и неорганической химии Академии наук Республики Узбекистан, Узбекистан
Ташкент

В результате масштабного выращивания плодовоовощной продукции в нашей республике широко налажено производство и хранение сока из нее, который сохраняется путем консервирования. В этих процессах широко используются процессы пастеризации или стерилизации после термической обработки. Поэтому важно знать физико-химические свойства отжатых соков.

Ускорение тепловых процессов приводит к повышению производительности оборудования, уменьшению габаритов и сокращению занимаемых производственных площадей. Это, в свою очередь, снижает затраты на эксплуатацию и ремонт отопительного оборудования, увеличивая объем выработки на одного работника. Ускорение термических процессов сокращает время нагрева материала, однако это не должно приводить к снижению качества продукции.

Ключевые слова: Турбулизаторы, турбулент, хаотичный, ребристой, труба в трубе, стержни, пастеризатор.

Study of the influence of hydrodynamic parameters of raw material flows on thermal efficiency

Ganijonov.D.I¹, Ismailov.O.Y²

¹ Gulistan State University. Uzbekistan Gulistan

² Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

As a result of the large-scale cultivation of fruit and vegetable products in our republic, the production and storage of juice from it, which is preserved by canning, has been widely established. Pasteurization or sterilization processes after heat treatment are widely used in these processes. Therefore, it is important to know the physico-chemical properties of the squeezed juices.

The acceleration of thermal processes leads to an increase in equipment productivity, a reduction in size and a reduction in occupied production areas. This, in turn, reduces the cost of operating and repairing heating equipment, increasing the output per employee. The acceleration of thermal processes reduces the heating time of the material, but this should not lead to a decrease in product quality.

Key words: Turbulators, turbulent, chaotic, ribbed, pipe in pipe, rod, pasteurizer.

Введение

Турбулизаторы широко используются для обеспечения турбулентного движения потока в трубопроводных системах с целью повышения эффективности теплопередачи. Турбулизаторы, установленные внутри этой трубы, обеспечивают хаотичный поток и повышают эффективность работы устройства по нагреву сырья. Однако со временем накопление мусора в «ребристой» части турбулизаторов, возникающее в результате сгорания и накопления органических веществ, снижает проницаемость труб и вызывает увеличение гидравлического сопротивления. В то же время внешняя масса с низкой теплопроводностью приводит к снижению устойчивости процесса теплообмена в устройстве.

На основании вышеизложенной информации были проведены экспериментальные работы на двухтрубном теплообменнике «пастеризатор» с целью изучения возможностей повышения температуры сырья на выходе из теплообменника «труба в трубе» с использованием специальных стержней вместо турбулизаторов. Принципиальная схема устройства представлена на рисунке 1.

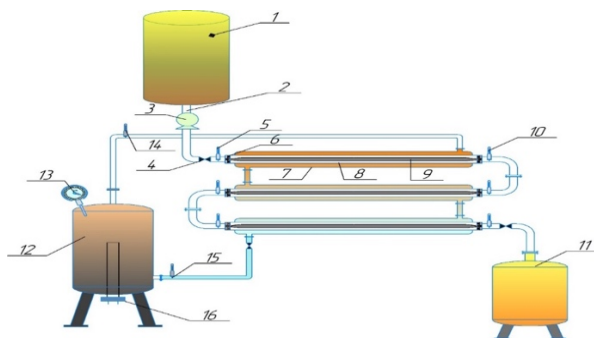


Рисунок 1 - Принципиальная схема экспериментальной установки для теплообмена «труба в трубе» (пастеризатора): 1 и 11 – емкость для сырья; 2 – труба для сырья; 3 – центробежный насос; 4 – ручка регулировки расхода сырья; 5 – термометр для измерения начальной температуры сырья; 6 – гайка для установки турбулизатора; 7 – наружная труба теплообменника; 8 – внутренняя труба теплообменника; 9 – шток (турбулизатор); 10 – термометр для измерения конечной температуры сырья; 12 – паровой котел; 13 – манометр для измерения давления паров; 14 и 15 – термометры для измерения температуры пара; 16 – электронагреватель

Экспериментальная часть

Экспериментальная установка изготовлена из нержавеющей стали марки AISI 304, внутренний диаметр паропроводящих труб $d = 12$ мм, наружный диаметр двухтрубного теплообменника $D = 50$ мм, внутренний диаметр труб $d = 20$ мм, длина $L = 1000$ мм и работает в следующей последовательности. В паровой котел 12 заливается необходимое количество воды (6 литров) и включаются 16 электронагревателей мощностью 2 кВт. Температура нагретой воды в системе измеряется с помощью 14 термометров, а давление — с помощью 13 манометров. Когда температура в системе достигает $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, а давление повышается до 200 кПа, включаются 3 насоса и жидкость из 1 сосуда по 2 трубам перекачивается во внутреннюю трубу 8 теплообменников. Расход сырья регулируется с помощью 4 клапанов. Температура нагретого сырья, поступающего в первую секцию аппарата, измеряется 5 термометрами, а температура на выходе из первой секции — 10 термометрами. Таким образом, температуры во второй и третьей секциях также измеряются с помощью термометров. 11 выходов из третьей секции собираются в сборный контейнер.

В экспериментальной установке трубчатого теплообмена для изучения влияния гидродинамических режимов потока на температуру потока использовались специальные стержневые турбулизаторы. Использовались два типа стержней: цельный стержень (рисунок 2. а) и стержень с проволоочной направляющей (рисунок 2. в).

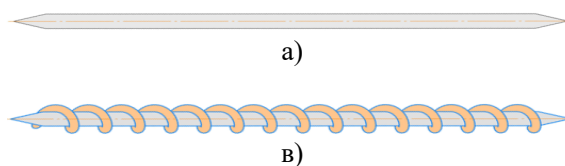


Рисунок 2 - Стержни турбулизатора: а) цельный стержень; в) направляющий стержень для проволоки

Экспериментальная установка была спроектирована таким образом, чтобы предотвратить изменение температуры нагретого потока, а в качестве контроля использовалась вода. Для проверки экспериментов в реальных условиях использовались свежесжатые яблочный и вишневый соки. Для изучения изменения температуры при нагревании использовались стержни.

Экспериментальное устройство запрещало изменять температуру нагреваемого потока, в качестве контроля использовалась вода. А для проверки экспериментов в реальных условиях использовались свежесжатые яблочный и вишневый соки. Для исследования изменений температуры в процессе нагрева использовались стержни.

Таблица 1

Зависимость времени подачи сока на устройство от расхода

Объемный расход сока $V, 10^5 \text{ м}^3/\text{с}$	Время приготовления сока в трубчатом устройстве для пастеризации τ , сек.	
	Простая труба	Труба, установленная на стержне
1,66	56,7	36,3
3,33	28,2	18,1
5,0	18,8	12,05
6,66	14,2	9,05
8,33	11,3	7,23

Результаты эксперимента показали, что, если в пастеризаторе содержался нерастворимый желатин, то его можно было использовать для получения желатина. Расчетный расход воды в устье составляет от $1,66 \cdot 10^{-5}$ до $8,33 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$, что в два раза превышает расчетный расход воды в устье. Стержень был изготовлен из нержавеющей стали, в 1,56 раза более прочной, чем стержень из нержавеющей стали.

Таблица 2

Изменение температуры в первом секторе двухтрубного теплообменного устройства

Хомашё	1-секцияга киришдаги ҳарорат $t_{\text{кир1}}, ^\circ\text{C}$	1-секциядан чиқишдаги ҳарорат $t_{\text{чиқ1}}, ^\circ\text{C}$		
		Оддий қувур	Стержен	Сим йўналтиргич ўрнатилган стержен
Сув (контроль)	20	42	51	52
Олма шарбати “Голден Рейнджерс”	20	43	53	55
Олча шарбати “Қора шпанка”	20	43	52	53

Из данных, представленных в таблице 2, следует, что начальная температура объектов исследования на входе в двухтрубную пастеризационную установку составляла 20°C , в то время как температура воды на выходе из первого сектора повышалась до 42°C в простой трубе без установки стержня, в то время как в яблочном и вишневом соках эта температура составляла цифра составила 43°C . Установив специальный стержень на внутреннюю трубу двухтрубного устройства, было установлено, что температура воды повышается с 51°C до 53°C яблочного сока, а температура вишневого шарубинига - до 52°C . Однако в Стерье, где была установлена проволочная направляющая, было замечено, что температура на выходе из сектора Биричи повысилась до 52, 55 и 53°C соответственно.

Таблица 3

Изменение температуры во втором секторе двухтрубного теплообменного устройства

Хомашё	Оддий қувур		Стержен		Сим йўналтиргич ўрнатилган стержен	
	$t_{\text{кир2}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{чиқ2}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{кир2}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{чиқ2}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{кир2}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{чиқ2}}, ^\circ\text{C}$
Сув (контроль)	42	61	51	74	52	75
Олма шарбати “Голден Рейнджерс”	43	62	53	75	55	77
Олча шарбати “Қора шпанка”	43	61	52	75	53	76

Из данных таблицы 3.2, приведенных в результатах эксперимента с использованием пастеризатора, следует, что при использовании пастеризатора во второй секции суспензии

содержалось 42 °С. В экспериментах, проведенных стержнем, было показано, что в 61 °С, в то время как в экспериментах, проведенных стержнем, от 51 до 74 °С, симбиотический стержень находится в диапазоне от 52 до 75 °С. В зависимости от того, в каком состоянии находится стержень, его размер может варьироваться в пределах от 43÷62°С, от стержня, на котором он установлен, до 52÷75 °С, от стержня, на котором установлен стержень, до 53÷77 °С.

Таблица 4

Изменение температуры в третьем секторе двухтрубного теплообменного устройства

Хомашё	Оддий қувур		Стержен		Сим йўналтиргич ўрнатилган стержен	
	t _{кир3} , °С	t _{чик3} , °С	t _{кир3} , °С	t _{чик3} , °С	t _{кир3} , °С	t _{чик3} , °С
Сув (контроль)	61	82	74	88	75	87
Олма шарбати “Голден Рейнджерс”	62	84	75	91	77	92
Олча шарбати “Қора шпанка”	61	83	75	90	76	91

Заключение

Данные из таблицы 3.3, в которой приведены изменения температуры в третьем секторе пастеризатора, показывают, что температура каждого теплоносителя увеличилась с 61 °С до 84°С в простом трубопроводе, с 75 °С до 91 °С в результате установки sterjen и с 75 °С до 92 °С в sterjen с установлена проволочная направляющая.

Список литературы

1. М.Ғ. Васиев, Қ.О. Дадаев, И.Б. Исабоев, З.Ш. Сапаева, З.Ж. Ғуломова. Озиқ-овқат технологияси асослари. –Т: “Ворис-нашриёт”, 2012. – 400 с.
2. Шобингер, У. Фруктовые и овощные соки: научные основы и технологии / Пер. с нем. под общ. науч. ред. А.Ю. Колеснова, Н.Ф. Берестеня и А.В. Орешенко. — СПб.: Профессия, 2004.
3. Ганиджонов, Д. И., & Хамдамов, М. Б. (2024). ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРУБЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТРОЙСТВ. Евразийский журнал академических исследований, 4(5 Part 2), 98-104.
4. G’anijonov, D. I., & Nurmuxamedov, A. A. (2023). WAYS OF EFFECTIVE UTILIZATION OF MILK WHEY. Евразийский журнал академических исследований, 3(12 Part 2), 19-23.

УДК 66.061.3

Голубина Е.Н., Кизим Н.Ф., Башлаев Л.А.

Интенсификация экстракции рзэ путем колебательного воздействия на переходный слой

Голубина Елена Николаевна – доктор химических наук, профессор кафедры «Фундаментальная химия»; Elena-Golubina@mail.ru.

Кизим Николай Федорович – доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой «Фундаментальная химия»;

Башлаев Леонид Александрович – магистрант 2 курса химико-технологического факультета.

Новомосковский институт (филиал) ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени

Д.И. Менделеева»,

Россия, Новомосковск, 301650, ул. Дружбы, 8.

Представлены данные по интенсификации экстракции редкоземельных элементов растворами ди-(2-этилгексил)фосфорной кислоты (Д2ЭГФК) или три-н-бутилфосфата (ТБФ) в неводном растворителе в проточной и статичной системах путем локального колебательного воздействия на динамический межфазный слой. Показано, что величина эффекта интенсификации зависит от природы извлекаемого элемента и растворителя. Более высокие значения коэффициента ускорения экстракции при использовании в качестве экстрагента Д2ЭГФК наблюдаются для статичной системы, а в случае ТБФ – для проточной системы. Полученные зависимости объяснены различием структуры динамического межфазного слоя.

Ключевые слова: Д2ЭГФК, интенсификация, колебания механические, редкоземельный элемент, ТБФ, экстракция.

Intensification of ree extraction by vibration impact on the interfacial layer

Golubina E.N., Kizim N.F. Bashlaev L.A.

Novomoskovsk Institute of D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Novomoskovsk, Russian Federation

The article presents data on the intensification of rare earth element extraction with di-(2-ethylhexyl)phosphoric acid (D2EHPA) or tri-n-butyl phosphate (TBP) solutions in a non-aqueous solvent in flow and static systems by local vibration on the dynamic interfacial layer. It is shown that the value of the intensification effect depends on the nature of the extracted element and the solvent. Higher values of the coefficient acceleration extraction when using D2EHPA as an extragent are observed for a static system, and in the case of TBP - for a flow system. The obtained dependences are explained by the difference in the structure of the dynamic interfacial layer.

Keywords: D2EHP, intensification, mechanical oscillations, rare earth element, TBP, extraction.

Введение

Жидкостная экстракция широко используется при выделении, разделении и концентрировании редкоземельных элементов (РЗЭ). Обычно ее проводят в эмульсионном режиме, используя аппараты различной конструкции [1,2]. В качестве экстракционного реагента используют три-н-бутилфосфат (ТБФ), ди-(2-этилгексил)фосфорную кислоту (Д2ЭГФК) или подобные им соединения, способные образовать комплекс, переходящий в органическую фазу. Эмульгирование, требующее затраты энергии на диспергирование одной из фаз системы, приводит к усложнению экстракционной аппаратуры, а последующее расслоение системы – к повышенным расходам энергии. Однако при этом достигается развитая поверхность контакта фаз и высокая скорость экстракции. Но ввиду того, что применяемые экстракционные реагенты являются хотя и слабыми, но поверхностно-активными веществами, в системах нередко образуются стойкие эмульсии и межфазные взвеси, существенно осложняющие работу экстракторов, иногда приводя к необходимости полной остановки процесса и их удаления из системы. Опыт показывает, что при экстракции РЗЭ основное сопротивление процессу массопереноса образующихся комплексов сосредоточено в переходном слое, иначе - динамическом межфазном слое, поэтому представляется целесообразной разработка аппаратов, работающих в доэмульсионном режиме, но при этом необходимо повышение скорости экстракции.

Тарасовым В.В. с сотр. [3] был предложен метод, заключающийся в воздействии на динамический межфазный слой (ДМС) движущейся ленты, пересекающей поверхность раздела фаз

и совершающей возвратно-поступательное движение. Часть межфазных образований адгезирует к ленте, при этом обновляется поверхность контакта фаз и возрастает скорость экстракции. Метод оказывается эффективным в начале процесса экстракции, поскольку снижает накопление межфазных образований в это время.

Целью настоящей работы является повышение скорости экстракции РЗЭ в доэмульсионном режиме путем локального колебательного воздействия на переходный слой системы.

Экспериментальная часть

Опыты в статичной системе проводили на установке, которая состоит из стеклянной ячейки, вибрирующего элемента, питание которого осуществлялось от генератора низкочастотных сигналов. Вибратор представлял собой высокочастотную электродинамическую головку с жестко закрепленным в центре диффузора стержнем из нержавеющей стали $\varnothing 0,05$ см и длиной 4,3 см, завершающийся вибрирующим элементом из фторопласта, имеющим в сечении вид равнобедренного треугольника, обращенного к поверхности раздела фаз вершиной. В стеклянную ячейку конусообразной формы наливали 8 мл водного раствора соли РЗЭ и аккуратно по стенке ячейки приливали 2 мл раствора Д2ЭГФК (или ТБФ) в неводном разбавителе.

Экстракцию РЗЭ в динамичной системе проводили на установке, которая представляла собой стеклянную ячейку цилиндрической формы диаметром 10 мм, с четырьмя штуцерами для ввода и вывода водного и органического растворов, замкнутым контуром водной фазы и замкнутым контуром органической фазы. Жидкости перекачивали насосами, водный раствор – перистальтическим насосом, органический раствор – специально изготовленным из нержавеющей стали центробежным насосом [4]. Объем каждой фазы в каждом опыте составлял 10 мл. Все соединения контура органической фазы, включая трубопроводы, выполнены из фторопласта.

Через заданный промежуток времени опыт прекращали, фазы разделяли и через стадию рекстракции фотоколориметрически определяли концентрацию РЗЭ в органической фазе [5].

Для оценки влияния различных факторов на процесс экстракции при колебательном воздействии в ДМС использовали коэффициент ускорения экстракции (E), определяемый по выражению:

$$E = C_f / C, \quad (1)$$

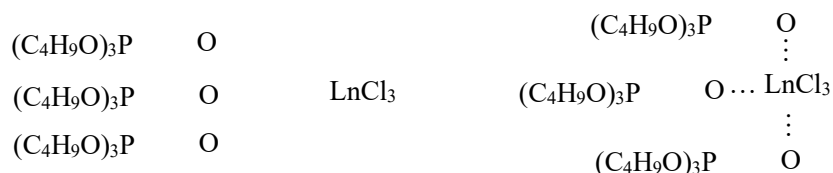
где C_f – концентрация Ln(III) в органической фазе за определенное время при колебательном воздействии в ДМС, C – концентрация Ln(III) в органической фазе, извлекаемого за то же время, но в отсутствие колебательного воздействия виброэлементом.

Статистическая обработка экспериментальных данных показала, что ошибка эксперимента не превышает 10 %.

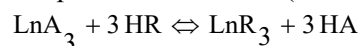
Результаты и их обсуждение

Экстракция РЗЭ растворами ТБФ протекает по сольватному механизму, вследствие образования координационной связи между атомом кислорода в экстракционном реагенте с молекулой соли (образование сольвата вида $\text{LnCl}_3 \cdot 3 \text{ ТБФ}$).

Извлечение РЗЭ растворами ТБФ зависит от константы экстракции, на величину которой влияние оказывают порядковый номер элемента, составы фаз, кислотность водной фазы [1, 2].

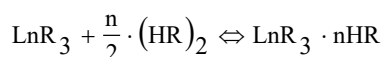


При экстракции РЗЭ растворами Д2ЭГФК (НР) в неводных разбавителях при невысоких значениях pH будет протекать реакция образования соли ди-(2-этилгексил)фосфата лантаноида



Образующийся по реакции ди-(2-этилгексил)фосфат лантаноида не растворим ни в водной, ни в органической фазе и способен накапливаться в межфазной области [5].

Одновременно с этим протекает и другая реакция



с образованием сольвата, растворимого в органической фазе.

Граница раздела двух несмешивающихся жидкостей является подвижной и колеблется с определенными частотами, зависящими от ряда факторов [6,7]. Если на динамический межфазный слой оказывать колебательное воздействие с частотой собственных колебаний, то возникнет резонанс, проявляющийся в повышении скорости экстракции, наблюдаемой в эксперименте [8,9]. Локальный подвод энергии в ДМС в виде колебательного движения вибрирующего элемента в нормальном к поверхности раздела фаз направлении приводит к изменению гидродинамической обстановки. Но поскольку призматический виброэлемент обращен вершиной к поверхности раздела фаз, то возникает движение жидкости в приповерхностных слоях и в тангенциальном направлении. Это обуславливает повышение скорости обновления поверхности раздела фаз и, как следствие, коэффициента ускорения экстракции (рис.1). В случае экстракции РЗЭ цериевой подгруппы растворами Д2ЭГФК формирующийся межфазный слой является гелеобразным (рис. 2а) и локальный подвод энергии приводит к уменьшению протяженности ДМС. Процесс экстракции РЗЭ иттриевой подгруппы сопровождается формированием кристаллизационных структур и вблизи вибратора наблюдается область свободная от межфазных образований, через которую в основном протекает экстракция (рис. 2б). Следует отметить, что при экстракции РЗЭ иттриевой и цериевой подгруппы межфазные образования группируются вблизи вибратора.

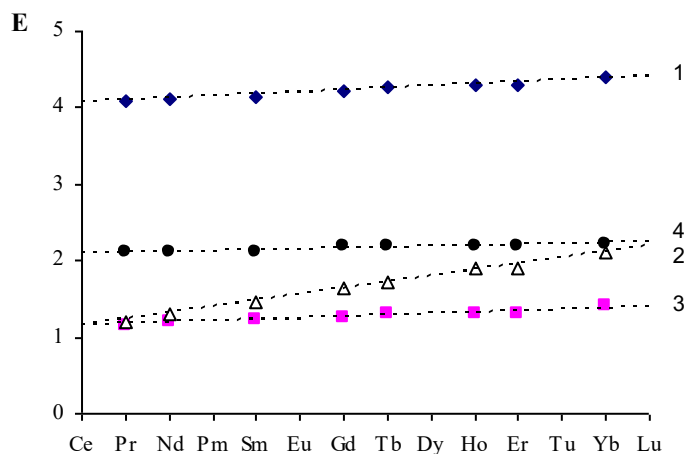


Рисунок 1 - Влияние природы РЗЭ на коэффициент ускорения экстракции, рассчитанный по формуле (1),

в статичной системе (1,3) и проточной системе (2,4).

Система 0,1 М водный раствор Ln(III) / 0,05 М раствор Д2ЭГФК (1,2) или ТБФ (3,4) в гептане.

Из рис. 1 видно, что при переходе от лантана к лютецию величина коэффициента ускорения экстракции возрастает, что обусловлено изменением структуры формирующегося ДМС. В проточной системе величина эффекта интенсификации ниже, чем в статичной. При движении водной и органической фаз в одном направлении степень обновления межфазной поверхности выше, чем в статичной системе. Но, движущиеся потоки жидкости могут приводить к частичному уносу межфазных образований из ДМС в органическую фазу и последующему их растворению в ней, что также приводит к обновлению поверхности и, как следствие, повышению степени извлечения РЗЭ и скорости экстракции.

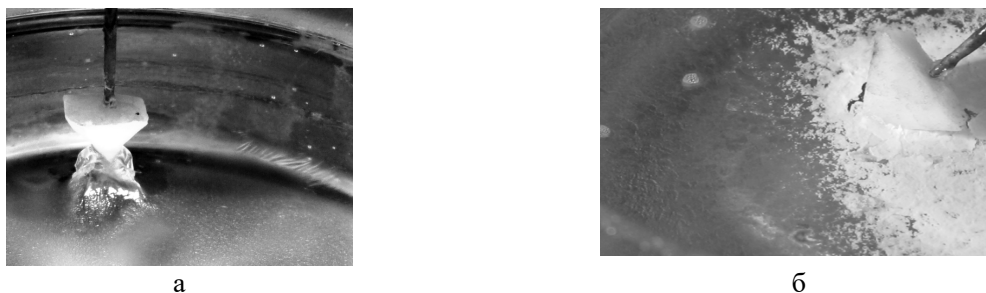


Рисунок 2 - Фотографические изображения фрагментов ДМС в системе $Er(III)$ -Д2ЭГФК (а) (или ТБФ) (б) в гептане при колебательном воздействии на ДМС

Влияние разбавителя экстракционного реагента на коэффициент ускорения экстракции выражено слабо (рис. 3). Заметно выше влияние природы экстракционного реагента. В случае Д2ЭГФК, обладающей более высокой поверхностной активностью чем ТБФ, обуславливающей возникновение локальных градиентов межфазного натяжения, развивающаяся спонтанная поверхностная конвекция более интенсивна, что и отражается на величине коэффициента ускорения экстракции (рис. 3).

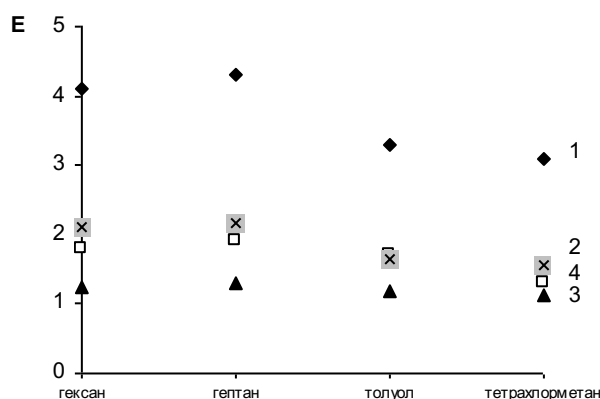


Рисунок 3 - Влияние природы растворителя на коэффициент ускорения экстракции в статичной системе (1,3) и проточной системе (2,4). Система 0,1 М водный раствор $Ln(III)$ / 0.05 М раствор Д2ЭГФК (1,2) или ТБФ (3,4) в неводном разбавителе

Более высокие значения коэффициента ускорения экстракции в случае использования в качестве экстрагента Д2ЭГФК наблюдаются для статичной системы, а в случае использования ТБФ – для проточной системы. Полученные данные могут быть объяснены различием структуры ДМС; его различной деформируемостью и разрушением [10-12].

Влияние локального колебательного воздействия на повышение скорости извлечения можно интерпретировать в рамках изотропной теории турбулентности, в основу которой положена идея колмогоровского каскада. Виброэлемент возбуждает пульсации малого масштаба с характеристическим размером l порядка амплитуды колебаний. Считая, что передача энергии между вихрями различных масштабов определяется только потоком энергии, то при увеличении подводимой энергии, легко достижимое повышением амплитуды колебаний, можно ожидать увеличение доли более крупномасштабных вихрей, а следовательно, должен выполняться закон «пяти третей» (закон Колмогорода-Обухова)

$$W(l) = C \cdot \varepsilon^{2/3} \cdot k^{-5/3}, \quad (2)$$

где $W(l)$ – спектральная функция; k – волновое число, определяемое как параметр, обратный линейному масштабу структуры (вихря); C – некоторая постоянная. Действительно при фиксированной частоте колебаний виброэлемента увеличение амплитуды колебаний приводит к повышению коэффициента ускорения экстракции; закон «пяти третей» выполняется, что подтверждено экспериментом [11].

Заключение

Локальное колебательное воздействие в динамическом межфазном слое приводит к интенсификации экстракции РЗЭ в проточной и статичной системах. Величина коэффициента ускорения экстракции определяется природой извлекаемого элемента и экстракционного реагента. Представленный метод повышения интенсивности экстракции может быть полезен при разработке энергосберегающих технологий, включающих стадию жидкостной экстракции.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научного проекта "Лаборатория «умных» материалов и технологий" проект № FSSM-2024-0005.

Список литературы

1. Ягодин Г. А., Каган С. З., Тарасов В. В. и др. Основы жидкостной экстракции. - М.: Химия, 1981. - 400 с.
2. Ритчи Г.М., Эшбрук А.В. Экстракция: принципы и применение в металлургии. – М.: Металлургия. 1983. – 480 с.
3. Тарасов В. В., Чжан Дун Сян, Ларин Г. Г. Массопередача при периодических возмущениях межфазной границы системы жидкость/жидкость // Теор. осн. хим. технологии. 2000. Т. 34. № 2. С. 188 - 194.
4. Golubina E., Kizim N., Alekseeva N. Intensification of the extraction of rare earth elements at the local mechanical vibration in the interfacial layer // Chemical Engineering & Processing: Process Intensification. 2018. V. 132. № 10. P. 98-104.
5. Бусев А. И., Типцова В. Г., Иванов В. М. Руководство по аналитической химии редких элементов. - М.: Химия. 1978 - 432 с.
6. Голубина Е.Н., Кизим Н.Ф. Накопление редкоземельных элементов в динамическом межфазном слое экстракционной системы при колебательном воздействии // Химическая технология. 2010. Т. 11. № 7. С. 424 – 430.
7. Кизим Н.Ф., Голубина Е.Н. Среднечастотное волновое движение жидкостей при спонтанной поверхностной конвекции // Журн. физич. химии. 2003. Т. 77. № 12. С. 2286 - 2290.
8. Кизим Н.Ф., Голубина Е.Н. Спонтанная поверхностная конвекция и скорость экстракции (реэкстракции) в системах с трибутилфосфатом и ди-(2-этилгексил)-фосфорной кислотой // Журнал прикладной химии. 2020. Т. 93. Вып. 7. С. 1005-1011.
9. Голубина Е.Н., Кизим Н.Ф., Чекмарев А.М. Резонансная частота как индикатор состояния динамического межфазного слоя в экстракционных системах с Д2ЭГФК // Доклады Академии Наук. – 2012. – Т. 447. – № 5. – С. 519-522.
10. Кизим Н.Ф., Голубина Е.Н., Чекмарев А.М. Резонансные свойства межфазной поверхности в системах жидкость/жидкость // Докл. РАН. 2003. Т. 392. № 3. С. 362–364.
11. Голубина Е.Н., Кизим Н.Ф. Экстракция редкоземельных элементов растворами ди-(2-этилгексил)фосфорной кислоты в проточной системе при локальном колебательном воздействии // Журнал прикладной химии. 2016. Т. 89. № 11. С. 1386-1391.
12. Голубина Е.Н., Кизим Н.Ф. Экстракция редкоземельных элементов растворами три-н-бутилфосфата при локальном колебательном воздействии в статичной и проточной системах // Журнал прикладной химии. 2018. Т. 91. № 5. С. 715-719.

УДК 62-531.3

Грызун А.В., Верлока И.И., Капанова А.Б.

Применение параметрического моделирования деталей дросселирующего узла осевого клапана для оценки гидравлического сопротивления

Грызун Александр Владимирович – аспирант; bobplunger@gmail.com.

Верлока Иван Игоревич – к.т.н., доцент кафедры;

Капанова Анна Борисовна – д.ф.-м.н., проф., заведующий кафедрой;

ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,

Россия, Ярославль, 150023, просп. Московский, дом 88.

В тезисах приведены результаты построения параметрической 3D-модели дросселирующего узла осевого клапана с дисковым затвором при варьировании его конструктивных параметров, проиллюстрированные примером расчета данного элемента конструкции и качественной оценкой значений гидравлического сопротивления при фиксированных значениях степени открытия регулирующего устройства.

Ключевые слова: клапан, кавитация, дросселирующий узел, 3D-модель, конструктивные параметры, гидравлическое сопротивление.

Application of parametric modeling of axial valve throttling unit parts to estimate hydraulic resistance

Gryzunov A.V., Verloka I.I., Kapranova A.B.

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

The abstract presents the results of constructing a parametric 3D model of a throttling unit of an axial valve with a butterfly valve with varying its design parameters, illustrated by an example of calculating this design element and a qualitative assessment of the hydraulic resistance values at fixed values of the opening degree of the regulating device.

Key words: valve, cavitation, throttling unit, 3D model, design parameters, hydraulic resistance.

Введение

Регулирующие клапаны являются важнейшими элементами трубопроводных систем, обеспечивающими управление потоками рабочей среды в условиях сложных технологических процессов. Одной из ключевых проблем, возникающих при эксплуатации таких устройств, является кавитация [1-3], которая приводит к значительным негативным последствиям как для самих клапанов, так и для смежного оборудования. В частности, явление гидродинамической кавитации возникает при резком снижении давления рабочей среды ниже критической точки насыщения пара, что сопровождается образованием и последующим схлопыванием кавитационных пузырьков. Этот процесс вызывает локальные скачки давления и температуры, что приводит к эрозии поверхностей, вибрациям, шуму и, в конечном итоге, к снижению срока службы оборудования [2]. Особенно ярко кавитация проявляется в зоне дросселирования регулирующих клапанов, где поток среды подвергается значительным изменениям скорости и давления. Схлопывание кавитационных пузырьков вызывает ударные волны, которые разрушают внутренние поверхности клапана, приводят к износу уплотнений и других критических элементов конструкции. Кроме того, кавитация может вызывать нестабильность работы системы, что негативно сказывается на точности регулирования и безопасности эксплуатации. В условиях промышленных объектов, таких как нефтеперерабатывающие заводы или системы транспортировки жидкостей, последствия кавитации могут быть катастрофическими, в том числе аварии и простои оборудования [2].

Для борьбы с кавитацией применяются различные подходы, включая конструктивные изменения дросселирующих узлов [4], использование материалов с повышенной стойкостью к эрозии [1, 2], а также оптимизацию режимов работы оборудования [5]. На основании проведенного обзора литературных источников [4] выявлено, что перспективным направлением совершенствования основных узлов клапанов является разработка конструкций, которые позволяют снизить интенсивность кавитационных эффектов за счет разделения потока на множество продольных каналов с меньшими перепадами давления. Данный подход реализован в дросселирующем узле «делитель потока-дисковый затвор» осевого регулирующего клапана [6], где поток среды в проходном сечении разбивается на мелкие струи с помощью расположенных на внутренней поверхности делителя потока конусообразных ручьев. Это позволяет минимизировать образование

кавитационных пузырьков и снизить их разрушительное воздействие в отношении внутренних органов клапана.

В соответствии с принципами системно-структурного подхода к проектированию аппаратов химических технологий [7, 8] и, в частности, дросселирующих узлов клапанов, целесообразно выделить два взаимосвязанных этапа моделирования изучаемых объектов. В частности, применяемое математическое моделирование гидродинамических и массообменных процессов, происходящих в проточных зонах клапанов в промышленных условиях, которые характерны для отраслей химической технологии [9-11], носит двойкий характер: аналитическое (например, при описании процессов гидродинамической кавитации, дросселирования потоков рабочих сред [9, 10]) с учетом физических свойств рабочей жидкости и параметрическое (в том числе при создании 3D-моделей дросселирующих узлов трубопроводной арматуры).

Цель настоящей работы – создание инструмента для геометрической параметризации конструкции осевого клапана [6] с использованием современных средств САПР, в том числе для качественной оценки значений гидравлического сопротивления в зависимости от фиксированных положений затвора. Для этого решены следующие задачи: 1) построение параметрической 3D-модели дросселирующего узла с возможностью варьирования его конструктивных параметров и обеспечения выбора положения затвора; 2) выполнение примера расчета конструктивных параметров дросселирующего узла согласно заданным ограничениям при управлении выбранными информационными переменными; 3) качественная оценка значений гидравлического сопротивления в зависимости от фиксированных положений затвора осевого клапана.

Параметрическое моделирование деталей дросселирующего узла осевого регулирующего клапана

Для разработки 3D-модели дросселирующего узла в соответствии с описанием конструкции [6] смоделированы две детали - делитель потока и дисковый затвор (рис. 1). Конструктивные параметры этих элементов осевого клапана [6], связи и ограничения представлены в Таблице 1.

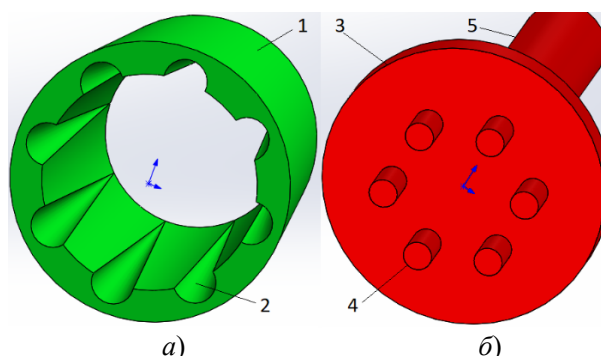


Рисунок 1 - 3D-модели деталей дросселирующего узла [6]: а) деталь I; б) деталь II; 1 — делитель потока;

2 — конусообразный продольный ручей делителя потока; 3 — дисковый затвор; 4 — цилиндрические выступы дискового затвора; 5 — шток дискового затвора.

Таблица 1

Параметры деталей дросселирующего узла осевого клапана

Деталь	Параметр		Управление параметром	Ограничения	Пример (рис. 1, а)
Делитель потока (деталь I)	D_1	внутренний диаметр, мм	задается	соответствует номинальному DN трубопровода	100
	L_1	длина, мм	задается	в рамках проектного решения	150
	Z_1	толщина стенки, мм	задается		15
	d_1	диаметр основания конуса продольных ручьев, мм	задается	центр основания совпадает с кривой окружности диаметра D_1 ; радиус основания не может превышать толщину Z_1	20

	n_1	количество продольных ручьев	задается	исключается пересечение соседних продольных ручьев	8
Дисковый затвор (деталь II)	D_2	диаметр диска, мм	D_1	соответствует внутреннему диаметру делителя потока	100
	Z_2	толщина диска, мм	задается	в рамках проектного решения	10
	D_3	диаметр цилиндрического выступа, мм	задается	в рамках проектного решения; исключается пересечение цилиндрических выступов, а также их совпадение с осью диска и поверхностью делителя потока	10
	L_3	длина цилиндрического выступа, мм	задается		15
	n_3	количество цилиндрических выступов	задается		6
	R_3	расстояние от центра диска до оси выступа, мм	задается		25
	D_4	диаметр штока, мм	задается	в рамках проектного решения	10
	L_4	длина штока, мм	задается		100

Сборка узла «делитель потока – дисковый затвор», представленная на рис. 2 обеспечивает выбор положения затвора для достижения фиксированного значения степени открытия δ делителя потока. Для проверки работоспособности модели наибольший интерес представляет набор конструктивных параметров

$$X_1 = \{D_1; L_1; d_1; n_1\}, \quad (1)$$

непосредственно влияющих на пропускную способность клапана [10, 12], а также степень открытия условного прохода δ , определяющая условия дросселирования.

В качестве примеров на рис. 2 приведены результаты перестроения трехмерной конструкции при изменении каждого геометрического показателя из набора X_1 , в том числе числа цилиндрических выступов n_1 и их размеров с учетом ограничений по пересечениям элементов из Таблицы 1.

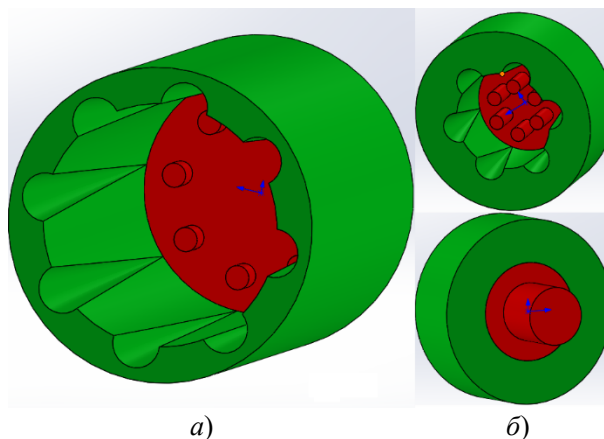


Рисунок 2 - Примеры 3D-моделей дросселирующего узла «делитель потока – дисковый затвор» [6]:
а) $D_1 = 100$ мм; $L_1 = 150$ мм; $d_1 = 20$ мм; $n_1 = 8$; $\delta = 0$ (клапан закрыт); $D_3 = 10$ мм; $n_3 = 8$; б) $D_1 = 34$ мм;
 $L_1 = 24$ мм; $d_1 = 10,4$ мм; $n_1 = 6$; $\delta = 0$ (клапан закрыт); $D_3 = 5$ мм; $n_3 = 6$.

Варьирование степени открытия клапана δ с соответствующим расчетом площади условного проходного сечения W_η (мм²) согласно [10, 12] позволяет выполнить оценку коэффициента

гидравлического сопротивления ζ_{tr} для фиксированных положений затвора. Результаты расчета значений ζ_{tr} для перестроенной 3D-модели (рис. 2, б) показаны в Таблице 2. С учетом конусообразной формы продольных ручьев горизонтальное смещение дискового затвора η (мм) относительно закрытого его положения ($\delta = 0$) рассчитывается по формуле

$$\eta = L_1 \sqrt{\delta}, \quad (2)$$

Значение ζ_{tr} определяется из соотношения площади условного проходного сечения W_η (мм²) и показателя пропускной способности клапана K_v (м³/ч) в соответствии с выражением [13, 14]

$$\zeta_{tr} = \left(5,04 \cdot 10^{-2} \frac{W_\eta}{K_v} \right)^2, \quad (3)$$

где значение W_η при текущей степени открытия клапана δ можно вычислить по известным геометрическим данным конструкции из набора X_1 согласно формуле

$$W_\eta = \delta_{n1} \cdot W_f, \quad (4)$$

Значение пропускной способности клапана K_v оценивается по заданным значениям максимального расхода Q_{max} (м³/ч) и минимального перепада давления Δp_{min} (кПа) согласно эмпирическим зависимостям [13, 14]

$$K_v = Q_{max} \left(\frac{2 \gamma_v}{3 \Delta p_{min}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

где W_f (мм²) – площадь условного проходного сечения одного ручья, γ_v (г·с/см³) – объемный вес регулируемой жидкости.

Таблица 2

Численные значения рассчитанных показателей процесса регулирования потока жидкости для разработанной параметрической 3D-модели дросселирующего узла осевого клапана.

Значения параметров набора X_1	Условия дросселирования (δ)	η , мм	K_v , м ³ /ч	ζ_{tr}
$D_1 = 34$ мм; $L_1 = 24$ мм; $d_1 = 10,4$ мм; $n_1 = 6$	0 (клапан полностью закрыт)	0	0	-
	0,2	10,73	0,1527	320,4523
	0,5	16,97	1,0410	43,1780
	0,8	21,47	3,2656	11,2096
	1 (клапан полностью открыт)	24,00	4,9213	7,7123

В работах [10, 12] применяются полученные данные оценочных значений коэффициента гидравлического сопротивления ζ_{tr} (Табл. 2) для фиксированных положений затвора, а, следовательно, и степени открытия регулирующего устройства.

Заключение

Таким образом, в ходе исследования выполнено: построение параметрической 3D-модели дросселирующего узла с возможностью варьирования его конструктивных параметров с выбором положения затвора; приведен пример расчета данного элемента конструкции осевого клапана; качественная оценка значений гидравлического сопротивления в зависимости от фиксированных значений степени открытия регулирующего устройства.

Результаты настоящей работы могут быть использованы при аналитическом моделировании гидродинамических и массообменных процессов, происходящих в проточных зонах осевых клапанов с дисковым затвором.

Список литературы

1. Кнепп Р. Кавитация / Р. Кнепп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит. М. : Мир, 1974. 668 с.
2. Арзуманов Э.С. Гидравлические регулирующие органы систем автоматического управления / Э. С. Арзуманов. М. : Машиностроение, 1985. 256 с.
3. Капранова А.Б. О методах моделирования основных стадий развития гидродинамической кавитации / А.Б. Капранова, А.Е. Лебедев, А.М. Мельцер, С.В. Неклюдов, Е.М. Серов // Фундаментальные исследования. 2016. № 3. С. 268-273.
4. Грызунов А.В. Анализ разновидностей современных антикавитационных решений в конструкциях регулирующих клапанов / А.В. Грызунов, И.И. Верлока, А.Б. Капранова, Е.Ф. Скурыгин // Южно-Сибирский научный вестник. 2024. Вып. 3 (55). С. 223-234.
5. Cavitation optimization of a throttle orifice plate based on three-dimensional genetic algorithm and topology optimization / T. F. Tang, L. Gao, B. Li, L. Liao, Y. Xi, G. Yang // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2019. V. 60, № 2. P. 1227-1244. DOI: 10.1007/s00158-019-02249-z
6. Пат. 2826467 Российская Федерация, МПК F16K 1/12. Клапан осевой / А. Е. Лебедев, Д. А. Крутилов, И. С. Гуданов, Е. А. Есин, Т. Н. Новиков, А.Б. Капранова, А.В. Грызунов, М.Н. Романова, М.М. Чигирев, А.В. Лебедева, Е.А. Виноградова, И.С. Шеронина. № 2024107816; Заявл. 25.03.2024; Оpubл. 11.09.2024, Бюл. №25.
7. Кафаров В.В. Анализ и синтез химико-технологических систем / В. В. Кафаров, В. П. Мешалкин. М. : Химия, 1991. 431 с.
8. Мешалкин В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергетической эффективности химико-технологических систем. Смоленск: ООО «Принт-экспресс», 2021. 442 с.
9. The Applying of the Formalism of Cyber-Physical Systems in the Description of Hydrodynamic Cavitation in a Direct-Flow Valve / A. B. Kapranova, A. E. Lebedev, A. M. Melzer, S. V. Neklyudov, A. S. Brykalov // In monograph: Cyber-Physical Systems: Modelling and Intelligent Control. Studies in Systems, Decision and Control / eds. A. Kravets, A. Bolshakov, M. Shcherbakov. Springer, Cham, 2021. V. 338. P. 295-308. doi: 10.1007/978-3-030-66077-2_24
10. Капранова А.Б. Стохастическое моделирование ранней стадии кавитации в прямооточном клапане / А.Б. Капранова, А.В. Грызунов, И.И. Верлока, Е.Ф. Скурыгин, Е.А. Есин, М.Ю. Таршис // Южно-Сибирский научный вестник. 2024. Вып. 6 (58). С. 322-328.
11. Метод определения пропускной способности запорной арматуры / Д.А. Малов, А.В. Чернышев, Е.Б. Слободов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022. № 3 (744). С. 66-75.
12. Грызунов А.В. Конструктивное решение подавления кавитационных возмущений в системах управления технологическими процессами / А.В. Грызунов, И.И. Верлока, Е.А. Есин, Д.А. Назимова, А.Б. Капранова, Е.Ф. Скурыгин // Южно-Сибирский научный вестник. 2024. Вып. 6 (58). С. 275-279.
13. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. М.: Недра, 1970. 216 с.
14. Арзуманов Э.С. Расчет и выбор регулирующих органов автоматических систем / Э. С. Арзуманов. М. : Энергия, 1971. 112 с.

УДК 66.061.3/66.011

Демкин К.М., Трубкина А.А., Комарова Д.С., Цыганков П.Ю.

Процессы массопереноса и кинетика сверхкритической экстракции эфирных масел лаванды

Демкин Кирилл Максимович – аспирант 1-го года обучения, заведующий лабораторией кафедры ХФИ; DemkinChem@yandex.ru.

Трубкина Анастасия Александровна – магистр 2-го года обучения;

Комарова Дарья Сергеевна – аспирант 1-го года обучения, инженер кафедры ХФИ;

Цыганков Павел Юрьевич – к.т.н, доцент кафедры ХФИ.

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,
Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В тезисах рассмотрена сверхкритическая флюидная экстракция эфирных масел лаванды. Изучено влияние давления (120–200 бар) и температуры (40–60°C) на выход эфирных масел лаванды. Установлено, что повышение давления увеличивает выход, тогда как рост температуры при низких давлениях снижает его, но при высоких давлениях возможен кроссоверный эффект. Кинетика экстракции описана математической моделью, выявлены коэффициенты массопереноса ($0.28\text{--}1.25 \times 10^{-8}$ м/с). Процесс протекает в кинетическом режиме, константа равновесия стремится к нулю. Ключевые слова: сверхкритическая экстракция, диоксид углерода, моделирование, коэффициент массопереноса, лаванда

Mass transfer processes and kinetics of supercritical extraction of lavender essential oils

Demkin K.M., Trubkina A.A., Komarova D.S., Tsygankov P.U.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The theses discusses supercritical fluid extraction of lavender essential oils. The effect of pressure (120-200 bar) and temperature (40-60°C) on the yield of lavender essential oils was studied. It has been found that an increase in pressure increases the yield, while an increase in temperature at low pressures reduces it, but at high pressures a crossover effect is possible. The kinetics of extraction is described by a mathematical model, and mass transfer coefficients ($0.28\text{--}1.25 \times 10^{-8}$ m/s) are revealed. The process proceeds in kinetic mode, the equilibrium constant tends to zero.

Keywords: supercritical extraction, carbon dioxide, modeling, mass transfer coefficient, lavender

Введение

В настоящее время химическая технология развивается высокими темпами, что приводит к постепенному замещению традиционных методов переработки сырья более эффективными и ресурсосберегающими процессами. В области экстракции биологически активных веществ из растительного сырья по-прежнему широко применяются такие методы, как паровая дистилляция, мацерация, экстракция Сокслета и механическое прессование [1,2]. Однако эти процессы обладают рядом существенных недостатков, включая высокие энергозатраты, низкую селективность извлечения, длительность проведения процесса экстракции и необходимость дополнительной очистки целевого продукта от следов экстрагента. Паровая дистилляция, несмотря на широкое применение в производстве эфирных масел, сопровождается потерей термолабильных соединений и требует значительных затрат энергии. Мацерация отличается низким коэффициентом массопереноса и требует продолжительного времени процесса. Экстракция Сокслета предполагает многократное испарение и конденсацию растворителя, что приводит к высокой энергоёмкости процесса и аналогично с паровой дистилляцией также способствует потери термолабильных соединений. Кроме того, во всех перечисленных процессах для извлечения неполярных соединений нередко применяются токсичные растворители, такие как гексан и хлороформ, что ограничивает использование полученных экстрактов в пищевой и косметической промышленности. Даже после удаления экстрагента его остаточные количества могут сохраняться в экстракте, в связи с этим к очистке продукта предъявляются дополнительные требования. Механическое прессование обеспечивает лишь частичное извлечение целевых соединений и не позволяет эффективно извлекать вещества, локализованные внутри клеточной структуры сырья. В связи с этим актуальной задачей является внедрение в промышленность новых методов экстракции, обеспечивающих высокую степень извлечения биологически активных веществ при минимальных затратах энергии и ресурсов.

Одним из наиболее перспективных направлений в области экстракции является сверхкритическая флюидная экстракция (СКФЭ), основанная на использовании сверхкритического диоксида углерода в качестве экстрагента [3]. Углекислый газ, находящийся в сверхкритическом состоянии, обладает

уникальными физико-химическими свойствами, сочетая высокую диффузионную способность, характерную для газов, с растворяющей способностью, присущей жидкостям из-за его высокой плотности [4]. Данные характеристики способствуют его проникновению в пористую структуру растительного сырья и эффективному извлечению целевых компонент. Дополнительным преимуществом сверхкритического диоксида углерода является возможность точной регулировки его растворяющей способности за счёт изменения температуры и давления, что позволяет оптимизировать процесс экстракции в зависимости от свойств извлекаемого вещества [5]. Применение СКФЭ обеспечивает ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными методами, включая высокую селективность процесса, возможность проведения экстракции при низких температурах, высокую скорость массопереноса, а также отсутствие необходимости использования токсичных органических растворителей и высокую скорость массопереноса [6]. Кроме того, после СКФЭ диоксид углерода переходит в газообразное состояние, полностью удаляясь из системы, что исключает необходимость дополнительной очистки экстракта от экстрагента и обеспечивает его высокую степень чистоты.

Одним из перспективных объектов для СКФЭ является лаванда (*Lavandula angustifolia*), эфирное масло которой широко применяется в косметической, фармацевтической и пищевой промышленности [7]. Оно содержит ценные биологически активные соединения, включая линалоол, гераниол и камфору, которые обладают антисептическими и противовоспалительными свойствами. Оптимизация условий СКФЭ для экстракции эфирных масел лаванды позволяет повысить выход и сохранить его ценные компоненты, что делает данный метод перспективным для промышленного использования [8].

Однако, несмотря на значительные преимущества, процессы массопереноса и кинетика СКФЭ остаются недостаточно изученными. В частности, сложность представляет моделирование процессов взаимодействия сверхкритического флюида с клеточной структурой сырья, прогнозирование кинетики перехода экстрагируемых компонентов в сверхкритическую фазу. Отсутствие детальных данных о кинетике и массопереносе ограничивает возможности масштабирования СКФЭ и её промышленного внедрения. Изучение закономерностей массопереноса и разработка математических моделей, описывающих кинетику процесса, позволят интенсифицировать экстракцию, оптимизировать её параметры и повысить эффективность промышленного использования данной технологии. В связи с этим исследование массопереноса и кинетики СКФЭ эфирных масел лаванды представляет собой актуальную научно-практическую задачу, решение которой будет способствовать развитию технологий получения биологически активных веществ с высокой степенью чистоты.

Экспериментальная часть

Процесс СКФЭ проводился на установке собственной конструкции, технологическая схема которой представлена на рисунке 1.

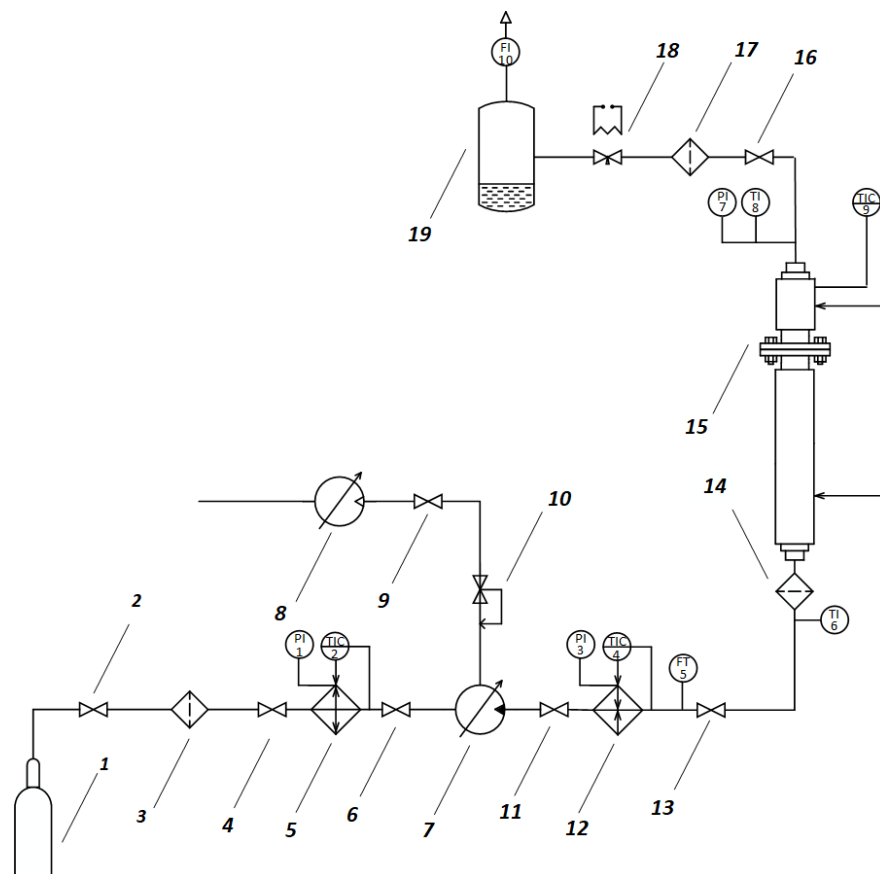


Рисунок 1 - Схема установки для проведения процесса сверхкритической экстракции: 1 – баллон с диоксидом углерода; 2, 4, 6, 9, 11, 13, 16 – запорные клапана; 3, 14, 17 – микронные фильтры; 5 – конденсатор; 7 – насос; 8 – компрессор; 10 – редуктор давления; 12 – термостат; 15 – аппарат высокого давления объемом 250 мл; 18 – вентиль тонкой регулировки с подогревом; 19 – сепаратор; TIC2, TIC4, TIC10 – регуляторы температуры; PI1, PI3, PI7 – манометры; FT5 – кориолисовый расходомер; TI6, TI8 – термометр; F110 – ротаметр

Диоксид углерода из баллона 1 пропускается через микронный фильтр 3, который необходим для улавливания твердых частиц, способных повредить поршень насоса 7. После этого диоксид углерода поступает в охлаждающую емкость 5, где он охлаждается и переводится в жидкое состояние, далее жидкий диоксид углерода перекачивается пневматическим поршневым насосом высокого давления 7, работающим на сжатом воздухе компрессора 8, в емкость предварительного нагрева 12, где он нагревается до сверхкритических условий. Затем диоксид углерода поступает в 250мл экстрактор высокого давления 15, где быстро проникает в твердую матрицу и растворяет эфирные масла. Растворенные эфирные масла поступают из экстрактора высокого давления через вентиль тонкой регулировки 18 поступают в сепаратор 20, где из-за уменьшения давления экстрагированные вещества осаждаются. Затем отработанный диоксид углерода сбрасывается в атмосферу.

Сам процесс экстракции проводили следующим способом. Измельчённое сырьё лаванды массой 25 г загружали в аппарат высокого давления объёмом 250 мл и герметизировали экстракционную камеру. Затем проводили этап набора давления: в экстрактор подавали предварительно нагретый диоксид углерода, доводя систему до заданных параметров температуры и давления. После установления необходимых условий начинался этап динамической экстракции, в ходе которого сверхкритический диоксид углерода непрерывно пропускали через экстрактор с постоянным расходом в 1 кг/ч. В процессе динамической экстракции на 5-й, 10-й, 20-й, 30-й, 40-й, 50-й и 60-й минутах эфирные масла собирали в отдельные пробирки для определения массы выделяющихся эфирных масел на различных этапах процесса. Это позволило оценить скорость экстракции и динамику выделения эфирных масел. По завершении динамической экстракции, продолжавшейся 60 минут, подачу диоксида углерода прекращали, после чего в течение 10–15 минут проводили этап сброса давления, снижая его до атмосферного. Затем выполняли разгрузку экстрактора:

отработанный шрот извлекали, а экстрактор с запорной и регулирующей арматурой промывали 70%-ным водным раствором изопропанола.

Так как ключевыми параметрами процесса СКФЭ являются давление и температура, для оценки их влияния на массовый выход эфирных масел был поставлен полнофакторный эксперимент 3^2 , с варьированием двух факторов – давления и температуры на трех уровнях, давление варьировалось в диапазоне от 120 до 200 бар, а температура от 40 до 60°C.

Выход эфирных масел в проведенных экспериментах варьируется от 2.90 до 6.78 масс.%. Установлено, что увеличение давления приводит к повышению массового выхода эфирных масел, что обусловлено возрастанием плотности сверхкритического диоксида углерода, являющейся одним из определяющих факторов эффективности процесса экстракции. При увеличении давления плотность сверхкритического диоксида углерода возрастает, что приводит к повышению его растворяющей способности по отношению к экстрагируемым компонентам. Температура оказывает комплексное влияние на процесс экстракции: с одной стороны, её повышение способствует увеличению коэффициента диффузии, а с другой - приводит к снижению плотности сверхкритического диоксида углерода, уменьшая его растворяющую способность. При определённом сочетании давления и температуры наблюдается кроссоверный эффект, при котором зависимость растворимости эфирных масел от температуры меняет направление. В области низких давлений повышение температуры приводит к снижению выхода экстракции, тогда как при достаточно высоких давлениях наблюдается обратная тенденция. Данный эффект связан с конкурентным влиянием плотности сверхкритического диоксида углерода и коэффициентом диффузии. Наименьший выход масла зарегистрирован при сочетании низкого давления и высокой температуры, что подтверждает значительное снижение растворяющей способности сверхкритического диоксида углерода в этой области. Оптимальный диапазон температур определяется балансом между высокой плотностью сверхкритического флюида и коэффициентом диффузии, что позволяет достичь наибольшей эффективности экстракции.

На основе экспериментальных данных с помощью математического моделирования процесса СКФЭ произведена оценка кинетических характеристик процесса [9]. Аппроксимация экспериментальных кривых экстракции с использованием математической модели позволила определить коэффициенты массопереноса, значения которых находятся в диапазоне от 0.28×10^{-8} до 1.25×10^{-8} м/с в зависимости от давления и температуры.

Анализ полученных данных подтвердил, что коэффициент массопереноса изменяется под влиянием термодинамических параметров процесса. Установлено, что при повышении давления коэффициент массопереноса увеличивается, что связано с ростом плотности сверхкритического диоксида углерода и, как следствие, усилением его растворяющей способности. Напротив, увеличение температуры приводит к снижению коэффициента массопереноса, особенно при низких давлениях, что обусловлено уменьшением плотности сверхкритического диоксида углерода и ухудшением его растворяющей способности. Полученные результаты согласуются с известными закономерностями массопереноса в сверхкритических флюидных средах.

При этом значение константы равновесия, определяющейся как соотношение концентрации эфирных масел на границе раздела фаз и в сверхкритическом флюиде, во всех кинетических кривых оказалось равным нулю. Это означает, что в рамках данной модели экстракции процесс протекает в условиях, при которых равновесная концентрация эфирных масел в сверхкритическом диоксиде углерода значительно превышает их концентрацию на поверхности растительной матрицы. Тот факт, что значение константы равновесия стремится к нулю, указывает на то, что равновесное распределение эфирных масел между твердым и сверхкритическим состоянием практически отсутствует, и процесс экстракции определяется исключительно кинетикой массопереноса.

Полученный результат свидетельствует о высоком потенциале сверхкритического диоксида углерода как экстрагента, поскольку он не ограничивается растворимостью эфирных масел в нем, а интенсивно извлекает целевые компоненты за счёт высоких коэффициентов массопереноса. Кроме того, полученные результаты могут указывать на отсутствие заметных диффузионных ограничений на границе фаз. В большинстве традиционных экстракционных процессов экстрагируемые вещества постепенно переходят из твердой растительной матрицы в экстрагент до достижения равновесия, и скорость экстракции ограничена скоростью установления этого равновесия. Однако в данном случае, если равновесная концентрация в сверхкритическом диоксиде углерода значительно превышает содержание эфирных масел в растительном сырье, процесс становится кинетически контролируемым, и его интенсивность зависит преимущественно от коэффициента массопереноса, а

не от предельной растворимости компонентов. При этом демонстрируемая нелинейность процесса экстракции может быть обусловлена различной скоростью экстракции отдельных фракций масла. Терпеновые углеводороды экстрагируются быстрее, в то время как кислородсодержащие соединения переходят в флюидную фазу медленнее [10]. Это приводит к изменению скорости экстракции на разных этапах процесса, что проявляется в изменении формы кинетических кривых.

Таким образом, полученные данные подтверждают, что процесс СКФЭ эфирных масел лаванды протекает в режиме интенсивного массопереноса, без существенных ограничений со стороны термодинамического равновесия. Это объясняет высокую эффективность метода и его способность обеспечивать практически полное извлечение целевых компонентов за относительно короткое время.

Заключение

В ходе проведенного исследования изучено влияние давления и температуры на процесс СКФЭ эфирных масел лаванды. Установлено, что массовый выход эфирных масел увеличивается с ростом давления, однако при повышении температуры наблюдается снижение выхода масла, связанное с уменьшением плотности сверхкритического диоксида углерода и снижением его растворяющей способности.

На основе экспериментальных данных с помощью математического моделирования были описана кинетика экстракции для каждого эксперимента. Аппроксимация экспериментальных кривых позволила определить коэффициенты массопереноса, значения которых лежат в диапазоне $0,28\text{--}1,25 \times 10^{-8}$ м/с. Анализ полученных данных подтвердил, что коэффициент массопереноса увеличивается с ростом давления и снижается при повышении температуры. Обнаружено, что во всех кинетических кривых константа равновесия стремится к нулю, что свидетельствует о преобладании кинетического режима процесса. Таким образом, высокая растворяющая способность сверхкритического диоксида углерода обеспечивает эффективное извлечение эфирных масел. Кроме того, демонстрируемая нелинейность кинетических кривых может быть обусловлена различной скоростью экстракции отдельных фракций масла. Терпеновые углеводороды экстрагируются быстрее, в то время как кислородсодержащие соединения растворяются в сверхкритическом флюиде намного медленнее, что приводит к изменению скорости экстракции на разных этапах процесса.

Таким образом, результаты работы подтверждают высокую эффективность СКФЭ эфирных масел лаванды, демонстрируя возможность применения процесса в промышленном масштабе для получения биологически активных веществ высокой степени чистоты.

Список литературы

1. Коничев А. С. и др. Традиционные и современные методы экстракции биологически активных веществ из растительного сырья: перспективы, достоинства, недостатки // Географическая среда и живые системы. – 2011. – №. 3. – С. 49-54.
2. Usman I. et al. Traditional and innovative approaches for the extraction of bioactive compounds // International Journal of Food Properties. – 2022. – Т. 25. – №. 1. – С. 1215-1233.
3. Меньшутин Н. В. и др. Применение сверхкритической экстракции для выделения химических соединений // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. – 2021. – Т. 64. – №. 6. – С. 4-19.
4. Poling B.E. et al. The properties of gases and liquids. 5th ed. McGraw-hill New York. – 2001. – 768 С.
5. Cao X. et al. Molecular selectivity in supercritical CO₂ extraction of a crude oil // Energy & Fuels. – 2017. – Т. 31. – №. 5. – С. 4996-5002.
6. Ahmad T. et al. Supercritical fluid extraction: A review // J. Biol. Chem. Chron. – 2019. – Т. 5. – №. 1. – С. 114-122.
7. Prusinowska R., Smigielski K. B. Composition, biological properties and therapeutic effects of lavender (*Lavandula angustifolia* L.). A review // Herba polonica. – 2014. – Т. 60. – №. 2.
8. Danh L. T. et al. Comparison of chemical composition, antioxidant and antimicrobial activity of lavender (*Lavandula angustifolia* L.) essential oils extracted by supercritical CO₂, hexane and hydrodistillation // Food and bioprocess technology. – 2013. – Т. 6. – С. 3481-3489.
9. Reverchon E., Kaziunas A., Marrone C. Supercritical CO₂ extraction of hiprose seed oil: experiments and mathematical modelling // Chemical Engineering Science. – 2000. – Т. 55. – №. 12. – С. 2195-2201.
10. Aprotosoia A. C. et al. Essential oils of *Lavandula* genus: a systematic review of their chemistry // Phytochemistry Reviews. – 2017. – Т. 16. – С. 761-799.

УДК 664.922.2

Диссанайке К., Абдуллаева В.Т., Нурмухамедов Х.С., Каримов К.Ф., Самадий М.С.

К эффективности применения метода мгновенного сброса давления при переработке сырья аграрного сектора

Диссанайке К. аспирант. kasunkumar86@gmail.com

Абдуллаева В.Т. к.т.н. ТашХТИ, г.Ташкент. ул. Университетская, дом 2.

Нурмухамедов Х.С. д.т.н., проф. ТашХТИ, г.Ташкент, ул. Мирзо Улугбек, дом 41.

Каримов К.Ф. д.т.н., проф. ТГТИ, г.Ташкент, ул. Мирзо Улугбек, дом 41.

Самадий М.С. д.т.н., доц. КГТУ, г.Карши, ул. Кучабог, дом 17.

В тезисе рассмотрены эффективность применения метода мгновенного сброса давления при переработке сырья аграрного сектора. В Узбекистане, как ведущем производителе сельскохозяйственной продукции в Центрально-Азиатском регионе, важной задачей является оснащение перерабатывающих предприятий энергоэффективными и экологически чистыми технологиями. Одним из критических этапов переработки масличных семян и фруктовых косточек является их раскалывание, так как неэффективная очистка приводит к потерям ценного сырья. В данной работе исследуется метод мгновенного сброса давления острого пара для шелушения семян подсолнечника, дыни, тыквы, арбуза, а также косточек персика и абрикоса. Разработана и испытана лабораторная установка, состоящая из цилиндрического корпуса, снабженного системой быстрого сброса давления. Экспериментальные исследования показали, что исходная влажность семян существенно влияет на эффективность шелушения: повышение влажности приводит к снижению рабочего давления пара. Оптимальные параметры позволили достичь полного шелушения при сравнительно низких энергетических затратах, сохранив целостность ядра и минимизировав измельчение оболочки. Данный метод представляет собой перспективную технологию для переработки сельскохозяйственного сырья, обеспечивая высокое качество конечного продукта и снижая потери.

Ключевые слова: переработка, шелушение, мгновенный сброс давления, острый пар, влажность, энергетическая эффективность, очистка, ядро, оболочка.

On the efficiency of the application of the instantaneous pressure release method in the processing of raw materials of the agricultural sector

Dissanayake K.,¹ Nurmukhamedov Kh.S.², Karimov K.F.³, Samadiy M.S.⁴

^{1,4} Karshi State University

² Tashkent Institute of Chemical Technology

³ Tashkent state technical university

The theses discuss the efficiency of the instantaneous pressure release method in processing raw materials of the agricultural sector. In Uzbekistan, as a leading producer of agricultural products in the Central Asian region, an important task is to equip processing plants with energy-efficient and environmentally friendly technologies. One of the critical stages of processing oilseeds and fruit pits is their splitting, since ineffective cleaning leads to losses of valuable raw materials. This paper examines the instantaneous pressure release method of live steam for peeling sunflower, melon, pumpkin, watermelon seeds, as well as peach and apricot pits. A laboratory setup consisting of a cylindrical body equipped with a rapid pressure release system has been developed and tested. Experimental studies have shown that the initial seed moisture content significantly affects the peeling efficiency: an increase in moisture leads to a decrease in the working steam pressure. Optimum parameters made it possible to achieve complete peeling at relatively low energy costs, preserving the integrity of the kernel and minimizing shell crushing. This method is a promising technology for processing agricultural raw materials, ensuring high quality of the final product and reducing losses.

Keywords: processing, peeling, instantaneous pressure release, live steam, humidity, energy efficiency, cleaning, core, shell.

Введение

Узбекистан занимает лидирующее место среди республик Центрально-Азиатского региона по выработке сельскохозяйственных продуктов. Поэтому, оснащение предприятий перерабатывающих отраслей экономики страны энергетически эффективными, экологически чистыми технологиями и аппаратами, с целью повышения выхода готового продукта с наименьшими энергетическими затратами стоит очень остро [1].

При переработке сельскохозяйственного сырья образуется большое количество семян и косточек технических культур, которые в свою очередь являются сырьем для получения различных пищевых волокон и порошков, растительные масла пищевого и технического назначения. Одним из узких мест в технологии переработки подобных материалов является раскалывание семян и косточек. Эффективная очистка позволит снизить или полностью ликвидировать потери ценного сырья. Поэтому, разработка эффективного метода очистки семян и косточек актуальна и в настоящее время [2].

Выбор метода раскалывания осуществляется на основе механических свойств (прочность, упругость и пластичность) объектов переработки.

Существуют множество методов для первичной обработки и получения пищевых продуктов, основанных на следующих принципах или их сочетаниях: разрезание, скалывание, сжатие, удар, истирание и т.д. [1,3].

Выбор способа и оборудования для очистки сырья определяется видом поступающих на обработку овощей, мощностью предприятия и видом готовой продукции. Существуют следующие способы очистки корнеплодов от кожицы: термические (водопаровой, паровой, пароводотермический); химический (щелочной); механические (абразивной поверхностью, системой ножей, сжатым воздухом), комбинированные (щелочно-паровая и др.) [4-6]. Для некоторых видов корнеплодов (например, картофеля) используют способ очистки обжигом, т.е. путем кратковременного воздействия температурой 800-1200°C и экструзионный способы очистки.

В промышленности более распространены методы, основанные на ударе и разрезании семян. Также существуют способы: аэрошелушение, метод циклических изменений давления среды, метод мгновенного снятия избыточного давления пара, электрогидравлического эффекта и т.д. [1]. Но, по тем или иным причинам и недостаткам они не нашли промышленного применения. В настоящее время, общий недостаток применяемых методов в промышленности является не полное раскалывание или большие энергетические затраты.

Пищевые полуфабрикаты и порошки имеют ряд особенностей, в частности, освобождены от основной части влаги, имеют незначительный объем, массу и высокую концентрацию питательных веществ. *Относительно низкая их влажность благоприятствует длительному хранению без потери качества, существенно упрощает условия хранения и транспортировки; не требуется дорогостоящей и громоздкой тары для упаковки по сравнению со свежей и консервированной продукцией; существенно увеличивается независимость от внешних условий, срок хранения без значительных потерь полезных свойств исходного сырья по сравнению со свежими или консервированными продуктами.* Полуфабрикаты обладают высокими органолептическими свойствами и максимально сохраняют питательные свойства исходного продукта, а также расширяет диапазон использования его в пищевой промышленности [7].

Известен способ механической очистки овощей и фруктов, например, картофеля, моркови, лука [8]. Dornow K.-D. предлагает очистку производить вращающимися валками с шероховатой поверхностью, расположенными с равным расстоянием один от другого по поверхности воображаемого горизонтального полуцилиндра в корпусе машины.

Недостатки механической очистки заключаются в значительном количестве отходов, поэтому в последнее время предпочитают химические и паротермические методы очистки.

Barrat Richard установил, что процесс очистки картофеля и корнеплодов протекает более эффективно, если непосредственно перед очисткой применена тепловая обработка. Структура кожуры под действием тепла меняется, что способствует ее отделению от внутренних частей [9]. Однако тепловые контакты приводят к задубению подкожных слоев корнеплодов, ухудшая вкусовые качества изготавливаемых из них продуктов. Кратковременная обработка перегретым паром под высоким давлением позволяет воздействовать только на кожуру, не затрагивая подкожные слои корнеплодов.

Одним из эффективных методов сельскохозяйственного сырья, является метод мгновенного сброса давления острого пара. Экспериментальные исследования по обработке острым паром с последующим быстрым сбросом давления масличных семян, фруктовых косточек, семян бахчевых культур, корне- и клубнеплодов проведены на установке циклического действия [10].

Исследования по раскалыванию проведены с масличными семенами (подсолнечник, тыква, дыня, арбуз) и косточками (персик, абрикос) методом мгновенного сброса давления из замкнутого пространства. Целью подобных исследований является получение целых ядер и не измельченной

шелухи. Режимные параметры острого пара изменялись в пределах: избыточное давление пара $P=0,2-0,7$ МПа; влажность семян и косточек от 20 до 60%.

Принципиальная схема лабораторной установки для очистки семян, косточек, корнеплодов и т.д., а также сырого мяса состоит из цилиндрического корпуса, изготовленной из легированной стали X18H10T диаметром $d=0,219$ м, длиной $l=0,35$ м. Цилиндрический корпус имеет две опоры, которые при помощи металлических хомутов крепятся к бетонному основанию. К одной стороне цилиндра приварена плоское днище, а вторая имеет затвор с прокладкой и снабжена специальным устройством для мгновенного сброса давления острого пара в рабочей камере. Кроме того, к плоскому днищу приварен штуцер для ввода пара, и на нем установлен манометр для контроля давления острого пара внутри цилиндрического корпуса.

Для получения острого пара изготовлен паргенератор объемом $0,05$ м³ с электрическим обогревом. С обеих сторон к цилиндрическому корпусу приварены плоские днища и на одной из них штуцер для подачи пара в рабочую камеру. В верхней части испарителя имеется штуцер для ввода воды и предохранительный клапан.

На рис.1а и б представлены опытные данные по влиянию относительного давления на степень шелушения семян подсолнечника и дыни.

Из графика видно, что при влажности семян подсолнечника $U=10,8\%$, давлении острого пара $P=0,18$ МПа степень шелушения составляет $S=0,55$, с ростом $P=0,3$ МПа значение S повышается до $0,72$, и наконец, при $P=0,408$ МПа достигает полного шелушения, т.е. $S=1,0$ (рис. 1а). В опытах с влажностью семян $U=18,7\%$ при тех же режимных параметрах, т.е. при $P=0,25$ МПа, величина $S=0,73$, при $P=0,33$ МПа, значение $S=0,33$, а полное шелушение происходит при $P=0,36$ МПа. Подобная закономерность зафиксирована и для исходной влажности объекта $U=24,9\%$.

Экспериментальными исследованиями установлено, что исходная влажность существенно влияет на процесс достижения полного раскалывания. Из рис.1а видно, что повышение исходной влажности подсолнечника с $10,8$ до $24,9\%$, т.е. в 2 с лишним раз приводит к снижению рабочего давления пара почти в 1,24 раза. Особо следует отметить, что данный метод позволяет получить целое ядро и не измельченную оболочку из одинаковых 2-х половинок. Причем, после шелушения данным методом ядро выходит целым, с возросшей пористостью.

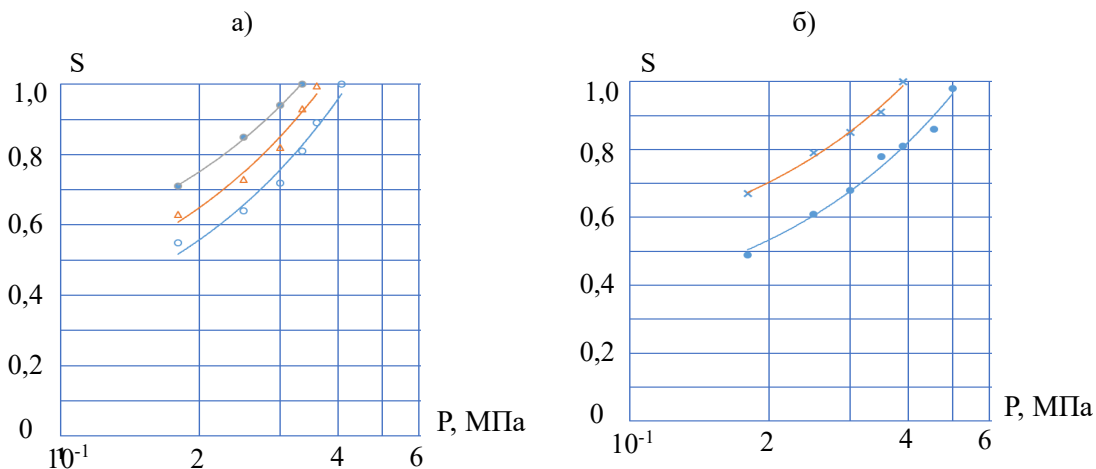


Рисунок 1 - Влияние давления острого пара на степень шелушения семян подсолнечника (а) и дыни (б).

○ – $U=10,8\%$; Δ – $U=18,7\%$; ● – $U=24,9\%$; ● – $U=38,1\%$; × – $U=61,3\%$.

В отличие от данных по шелушению подсолнечника, график $S=f(P)$ для дыни имеет другие численные значения, хотя характер изменения функции аналогичен (рис.1б). Например, при $P=0,25$ МПа и влажности $U=38,1\%$, степень шелушения $S=0,61$, а при влажности $U=61,3\%$ соответственно $S=0,79$. Рост относительного давления приводит к существенному увеличению степени шелушения. Так, при $P=0,39$ МПа для влажности $U=38,1\%$ параметр $S=0,81\%$, а для $U=61,3\%$, соответственно равен $S=1,0$. Анализ графика показывает, что полного шелушения семян дыни можно достичь при $P=0,39-0,5$ МПа в зависимости от исходной влажности материала.

Сравнение семян подсолнечника и дыни показывает, что подобная разница в степени очистки связана со спецификой строения и структуры внешней оболочки и связи 2-х половинок на линии концентрации напряжения.



Рисунок 2 - Фотоснимки семян подсолнечника (а), целых ядер (б) и неизмельченной шелухи (в).

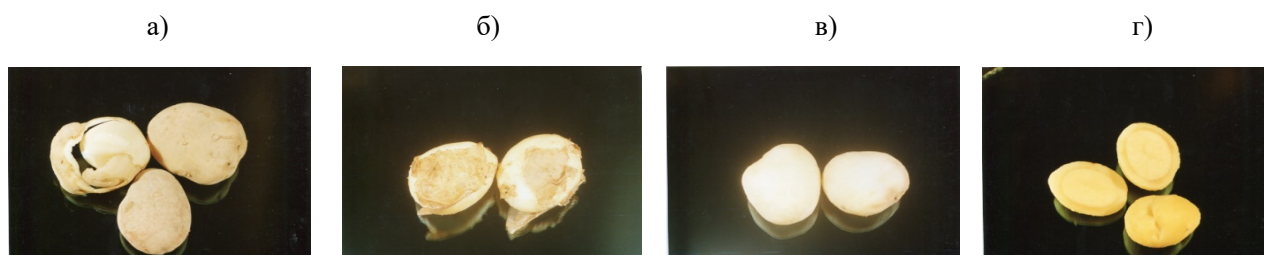


Рисунок 3 - Фотоснимки исходного (а), очищенного картофеля (б), кожицы (в) и поперечного разреза, подвергнутого обработке методом мгновенного сброса давления.

Одним из основных и важных преимуществ исследованного метода является возможность полной очистки клубней при низких потерях сырья.

Характерная особенность данного метода очистки в том, что размер клубней практически не влияет на эффективность процесса очистки. Как показали экспериментальные исследования, одинаково хорошо очищаются клубни со сложной конфигурацией независимо от их размера. Кроме того, наличие в составе сырья песка, камней и металлических примесей также не влияет на эффективность процесса очистки методом мгновенного сброса давления.

Теоретический анализ процесса и экспериментальных исследований показал высокую эффективность очистки корнеплодов методом мгновенного сброса давления. Отличительная особенность данного метода в том, что очищенный клубень остается не проваренным, т.е. сырым, а потери сырья снижаются в 3-5 раза. Налипшие же после очистки куски кожицы легко удаляются в процессе жидкостного псевдооживления слоя материала.

Также проведены исследования по приготовлению мяса методом мгновенного сброса давления при различных давлениях острого водяного пара. Опыты показали возможность достижения полного провара, независимо от сорта и вида мяса.

Экспериментальная часть

В экспериментах по влиянию давления острого пара на степень приготовления проведены в интервале изменения давления водяного пара 0,2-0,625 МПа и времени выдержки 0,5-6 минут.

Исходное мясо (говядина) имеет небольшую мраморность. Консистенция – плотная, упругая, свежее, красного цвета, мышцы в разрезе без кровавых пятен, жировая прослойка крошится.

Экспериментальные исследования по приготовлению мяса проведены при давлениях водяного пара в аппарате мгновенного сброса давления 0,25 – 0,625 МПа. Данная серия опытов проведена с получением давления водяного пара непосредственно в самом аппарате испарения 75 граммов воды. По достижению заданного давления производится выдержка объекта переработки в течении 120 с и затем резко сбрасывается давление острого пара из замкнутой системы.

На рис.4 представлены опытные данные по эффективности переработки мяса методом мгновенного сброса давления.

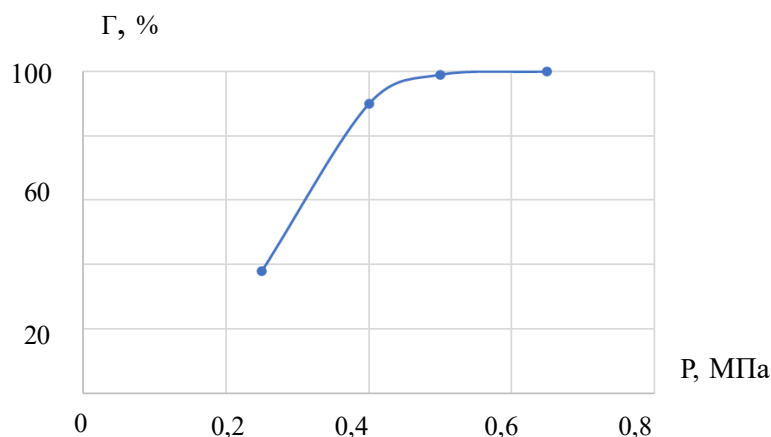


Рисунок 4 - Влияние давления водяного пара на степень проваривания мяса при обработке методом мгновенного сброса давления.



Рисунок 5 - Фотоснимки исходного (а) и мяса, подвергнутое обработке методом мгновенного сброса давления (б).

Видно, с повышением давления водяного пара P величина степени готовности мяса резко возрастает и уже при $P=0,4$ МПа выходит на уровень готовности 98,5%. Дальнейшее увеличение давления пара позволяет достичь 100%-ного уровня готовности (рис 5).

Заключение

Использование метода мгновенного сброса давления в технологии переработки маслосодержащих семян и фруктовых косточек позволяет расколоть объекты по линии концентрации напряжений. При этом, ядро не теряет целостности и получено неизмельченно ядро.

Аналогичные результаты получены и при очистке корне- и клубнеплодов. Причем процесс по данному способу не требует калибровки, удаления загрязнений, песка и других органических и минеральных примесей калибровка сырья перед очисткой. Характерная особенность заключается в том, что очистка происходит в виде сдиранья тонкой пленки кожицы.

Применение данного метода при переработке мяса также позволили получить положительные результаты и за короткое время достигнута высокая степень готовности объекта. Подобное воздействие острого пара на объект переработки эффективностью паротермической обработкой мяса. Немаловажным является и тот факт, что подобная обработка при давлениях острого приводит к уничтожению микроорганизмов

Список литературы

1. Белобородов В.В., Мацук Ю.П., Кириевский Б.Н., Кузнецов А.Т. Подготовительные процессы при переработке масличных семян. – М.: Пищевая промышленность, 1974. – 336 с.
2. Нурмухамедов Х.С., Нигмаджанов С.К., Шарипов Ш.П. и др. Расчет скорости начала псевдооживления зернисто-волоконистых материалов // ТОХТ, 1991. – т.25. - №4. – С.588-591.
3. Руководство по технологии и переработке растительных масел и жиров / под ред. А.Г.Сергеева. , Л.: - 1975. – т.1. – кн.2. – 316 с.
4. Ковалев В.С., Воронков В.И. Промышленное производство продуктов питания из картофеля. – Киев: Урожай, 1987. – 80 с.
5. Garrote R.L., Silva E.R., Bertone R.A. Effect of thermal treatment on steam peeled potatoes // Jour.Food Engen. -2000. - v.45.-N2.-p.67-76.

6. Roy S.S., Taylor T.A., Kramer H.L. Textural and ultrastructural changes in carrot tissue as affected by blanching and freezing // *Journal Food Science*, 2001. –v.66.-№1. - p.176-180.
7. Васильев А.В., Полоз Т.П., Соколов Н.Н. Лекарственные растения России – неиссякаемый источник для создания новых высокоэффективных лечебно-профилактических препаратов и биологически активных пищевых добавок // *Вопросы медицинской химии*, 2000. - №2. – С.16-20.
8. Патент ФРГ № 3913172, МПК⁵ A23N 7/00, A47J 17/00. Verfahren zum mechanischen Schalen von Erd-oder Baumfruchten in Schalmaschinen // Dornow Karl-Dietrich. – Р.5, Опубл. 25.10.1990 г.
9. Barrat Richard "State of the Art" steam peeling or thermal conditioning // *Food Trade Rev.*, 1989.- №9.- Р.470-471.
10. Глущенко А.И., Нурмухамедов Х.С., Темиров О.Ш. и др. Эффективная технология получения пищевых порошков из корне- и клубнеплодов. – Ташкент: ТХТИ, 2017.- 194 с.

УДК 621.927.9

Иванов Р.Н., Носов Г.А., Елиневская Л.С.

Определение коэффициента теплопередачи в бисерных мельницах

Иванов Роман Николаевич – с.н.с; r.ivanov@avgust.com

АО Фирма Август, Россия, Москва, 129515, ул. Цандера, дом 6.

Носов Геннадий Алексеевич - д.т.н., профессор кафедры;

Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА –

Российский технологический университет», Россия, Москва, 119571, пр-т Вернадского, дом 86.

Елиневская Лариса Степановна – к.х.н., начальник департамента;

АО Фирма Август, Россия, Москва, 129515, ул. Цандера, дом 6.

В тезисах рассмотрены тепловые процессы, происходящие в размольной камере бисерной мельницы.

Предложена модель теплообмена, учитывающая продольное перемешивание измельчаемой суспензии. Показан способ оценки коэффициента теплопередачи в бисерной мельнице.

Ключевые слова: бисерные мельницы, продольное перемешивание, коэффициент теплопередачи, теплообмен.

Determination of the Heat Transfer Coefficient in the Agitator Bead Mills

¹Ivanov R.N., ²Nosov G.A., ¹Elinevskaya L.S.

¹JSC Firm Avgust, Russia, Moscow, 129515, Tsander Street, 6.

²Institute of Fine Chemical Technologies named by M.V. Lomonosov, MIREA – Russian Technological University, Russia, Moscow, 119571, Vernadsky Avenue, 86.

The abstract examines thermal processes occurring in the grinding chamber of an agitator bead mill. A model of the thermal process is proposed that takes into account the longitudinal mixing of the grinding suspension. A method for determining the heat transfer coefficient is presented.

Keywords: agitator bead mills, longitudinal mixing, heat transfer coefficient, flow structure.

Введение

В настоящее время для получения тонкодисперсных суспензий широко используются бисерные мельницы. Это связано с тем, что бисерные мельницы имеют ряд преимуществ по сравнению с другими машинами для мокрого измельчения [1,2]. Часто, процесс измельчения в бисерной мельнице ведут в проходном режиме. При таком способе работы в размольную камеру непрерывно подается суспензия. Проходя размольную камеру, частицы дисперсной фазы подвергаются сдвиговым и сжимающим напряжениям за счет столкновения бисера между собой и частями помольной камеры. Таким образом, частицы дисперсной фазы измельчаются. Сами же мелющие тела движутся за счёт вращения ротора, установленного внутри размольной камеры и имеющего смесительные диски.

Известно, что в бисерной мельнице только часть механической энергии, подведённой к ротору мельницы, расходуется на измельчение частиц твёрдой фазы [1]. Большая часть подводимой энергии переходит в тепло за счёт различного вида трения. Поэтому для охлаждения суспензии в процессе её измельчения размольная камера бисерной мельницы оборудована охлаждающей рубашкой, в которую подаётся хладагент.

В состав продуктов в виде тонкодисперсных суспензий могут входить термолabile вещества. Также за счёт протекания различного рода поверхностных явлений во время измельчения для определённых составов жидких продуктов может получиться так, что процесс диспергирования следует проводить в определённых температурных диапазонах.

К сожалению, тепловые процессы в бисерных мельницах изучены пока слабо. Это связано с тем, что проходящие процессы внутри размольной камеры сложны и зависят от множества переменных [1,2]. К тому же известно, что измельчаемая суспензия движется внутри размольной камеры с ограниченным продольным перемешиванием [1,3,4]. Это значительно усложняет описание теплового процесса для проходного режима работы мельницы по сравнению с режимом циркуляции [5]. Таким образом, изучение тепловых процессов в бисерных мельницах является весьма актуальной задачей.

Цель данной работы заключается в разработке метода оценки коэффициента теплопередачи с учётом продольного перемешивания измельчаемой суспензии и апробация предложенной методики в лабораторных условиях.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования использовали лабораторную мельницу Dyno Mill MultiLab от компании WAB (Швейцария). Мельница MultiLab имеет объём камеры измельчения 0,561 л,

внутренний диаметр размольной камеры 77 мм и длину размольной камеры 150 мм. В качестве системы отделения бисера от продукта используется щелевой классификатор. В качестве мелющих тел использовали стеклянный бисер SL7505 со степенью наполнения $\varphi_V = 80\%$ об.

Эксперименты проводили на установке, схема которой изображена на рис.1. Во всех опытах рубашка мельницы была подключена к жидкостному термостату, который был заполнен водно-глицерольным раствором. Было установлено, что во всех опытах температура хладагента T'' на выходе охлаждающей рубашки в среднем повышается на $1\div 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ относительно начальной температуры T' . При этом средняя температура хладагента в рубашке мельницы T_{cp} составляла порядка $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

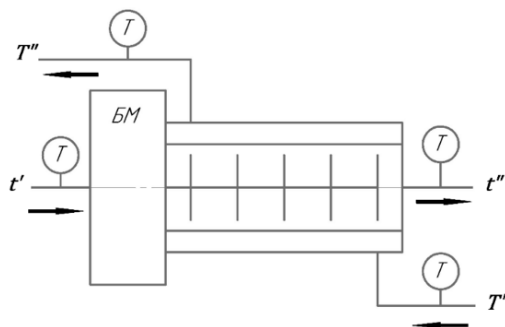


Рисунок 1 - Схема лабораторной установки: БМ – бисерная мельница, T – термометры: t' , t'' – начальная и конечная температура измельчаемого материала; T' , T'' – начальная и конечная температура хладагента.

Сначала были проведены эксперименты при подаче чистой воды. Затем проводили опыты при подаче водной суспензии мела с содержанием твёрдой фазы $a = 40\%$ масс.

В начале каждого эксперимента рабочая камера бисерной мельницы заполнялась исследуемой жидкостью (водой или суспензией). При этом изучаемую жидкость предварительно термостатировали до комнатной температуры. Далее устанавливали определённый расход жидкости G , частоту вращения ротора n_p и включали привод мельницы. Затем наблюдали за изменением значений температур на температурных датчиках. После того, как значения температуры всех потоков принимало постоянную величину, фиксировали все параметры эксперимента.

Для оценки количества выделяющегося тепла за счёт трения бисера в размольной камере $Q_{тр}$ мельницу запускали в периодическом режиме работы. Для этого предварительно перекрывали подачу хладагента и опорожняли рубашку мельницы. Затем заполняли размольную камеру чистой водой и запускали мельницу на 5 мин. По истечению установленного времени мельницу выключали и измеряли температуру воды внутри размольной камеры. После чего оценивали тепловые выделения за счёт трения бисера.

На рис. 2 представлена расчётная схема конвективного теплообмена при ограниченном продольном перемешивании одного из теплоносителей с использованием диффузионной модели [6]. Тепловой баланс для рассматриваемого контура имеет вид

$$Gct - \lambda_3 \frac{\partial(t)}{\partial x} S - Gc(t + dt) + \lambda_3 \frac{\partial(t + dt)}{\partial x} S - dQ = 0, \quad (1)$$

где G – массовый расход жидкости; c – теплоёмкость жидкости; T – средняя температура хладагента; dQ – бесконечно малое количество теплоты, переходящее от жидкости к хладагенту в элементарном контуре «к» через площадь df ; $G_{хл}$ – массовый расход хладагента; $c_{хл}$ – теплоёмкость хладагента; t' – температура жидкости на входе в рабочую камеру; t'' – температура жидкости на выходе рабочей камеры; t – температура жидкости на входе в элементарный контур; $t+dt$ – температура жидкости на выходе из элементарного контура; S – площадь поперечного сечения размольной камеры; $-\lambda_3(\partial(t)/\partial x)S$ и $-\lambda_3(\partial(t+dt)/\partial x)S$ – эффективный теплоперенос вдоль размольной камеры на входе и выходе элементарного контура; l – длина рабочей камеры; F – теплообменная поверхность рабочей камеры.

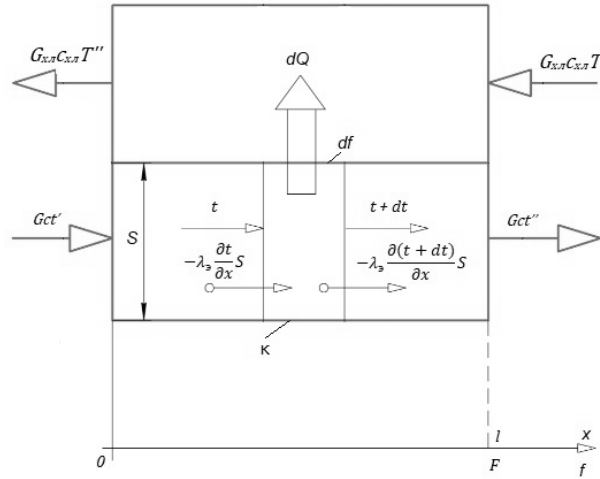


Рисунок 2 - К расчёту теплообмена между холодным теплоносителем с большой пропускной способностью и охлаждаемым потоком, движущимся с ограниченным продольным перемешиванием.

При этом величину dQ можно установить, используя уравнение теплопередачи

$$dQ = k(t - T)df \quad (2)$$

При совместном рассмотрении уравнений (1) и (2) получается следующее дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 t}{dx^2} - \frac{G_2 c_2}{\lambda_3 S} \frac{dt}{dx} - \frac{k f_0}{\lambda_3 S} t = - \frac{k f_0}{\lambda_3 S} T \quad (3)$$

Решение данного уравнения имеет вид (6)

$$t'' = (t' - T) e^{\frac{Pe_3}{2} - \sqrt{\left(\frac{Pe_3}{2}\right)^2 + \frac{kF}{Gc} Pe_3}} + T \quad (4)$$

При наличии бисера в контуре «к» (см. рис. 2) появляется дополнительный источник теплоты, выделяющийся за счёт сил трения

$$q_{тр} = \frac{Q_{тр}}{V_{GC}} = \frac{Q_{тр}}{S \cdot l} \quad (5)$$

где $Q_{тр}$ – полный тепловой поток от трения бисера, V_{GC} – объём размольной камеры.

После составления баланса теплоты и алгебраических преобразований для описания тепловых процессов в бисерной мельнице при наличии бисера получается следующее неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка

$$\frac{d^2 t}{dx^2} - \frac{G_2 c_2}{\lambda_3 S} \frac{dt}{dx} - \frac{k f_0}{\lambda_3 S} t = - \frac{q_{тр}}{\lambda_3} - \frac{k f_0}{\lambda_3 S} T \quad (6)$$

Решение данного уравнения имеет вид

$$t'' = \left(t' - T - \frac{Q_{тр}}{Gc} \left(\frac{kF}{Gc} \right)^{-1} \right) e^{\frac{Pe}{2} - \sqrt{\left(\frac{Pe}{2}\right)^2 + \frac{kF}{Gc} Pe}} + T + \frac{Q_{тр}}{Gc} \left(\frac{kF}{Gc} \right)^{-1} \quad (7)$$

Таким образом, для определения коэффициента теплопередачи было произведено построение семейства кривых, используя зависимость (7). При этом мы задавались несколькими величинами, а именно $kF/Gc = \{0,01; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 0,7; 1; 1,5; 2; 3,5; 10,25\}$ и значениями критерия Пекле $Pe =$

{0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10}. Также в процессе вычислений в уравнение (7) подставляли значения величин t' , T и Q_{mp} , которые были получены экспериментальным путём. После этого определяли по построенной зависимости отношение пропускных способностей kF/Gc , которое соответствует экспериментальному значению температуры t'' и значению Пекле Pe . По полученному значению kF/Gc и по заданным F , G и c оценивали значение коэффициента теплопередачи k для рассматриваемых опытных данных.

Результаты и их обсуждения

Пример кривых, полученных с использованием зависимости (7), представлен на рис. 3.

Из приведённых зависимостей видно, что чем выше отношение kF/Gc , тем лучше охлаждается проходящая суспензия. Также из зависимостей видно, что для зависимостей с kF/Gc от 0,01 до 1,5 повышение критерия Пекле приводит к повышению температуры суспензии на выходе размольной камеры. Для кривых с $kF/Gc \geq 2$ повышение критерия Пекле приводит к понижению температуры продуктовой суспензии.

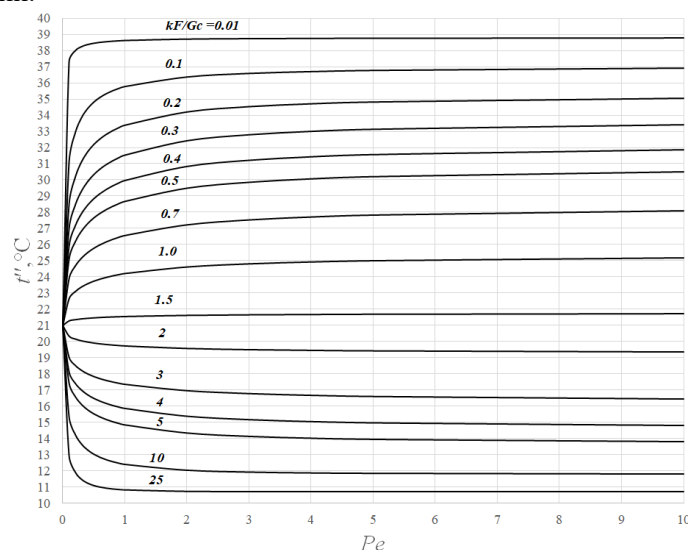


Рисунок 3 - Зависимость температуры суспензии на выходе мельницы t'' от критерия Пекле Pe при различном отношении пропускных способностей kF/Gc ($t' = 21^\circ\text{C}$ и $Q_{mp}/Gc = 18^\circ\text{C}$).

На рис. 4 приведена зависимость коэффициента теплопередачи k от расхода G и частоты вращения ротора мельницы n_p при пропускании чистой воды через размольную камеру. Из зависимостей видно, что для частоты вращения 2000 об/мин повышение расхода приводит к росту коэффициента теплопередачи k . Для частоты вращения ротора 3000 об/мин повышение расхода воды приводит к понижению коэффициента теплопередачи.

В опытах с измельчением суспензии мела значения коэффициента теплопередачи получились значительно ниже, около 20-50 Вт/(м²·°C).

На рис.5. Приведена зависимость коэффициента теплоотдачи для меловой суспензии. Из зависимостей видно, что повышение расхода суспензии приводит к уменьшению коэффициента теплоотдачи.

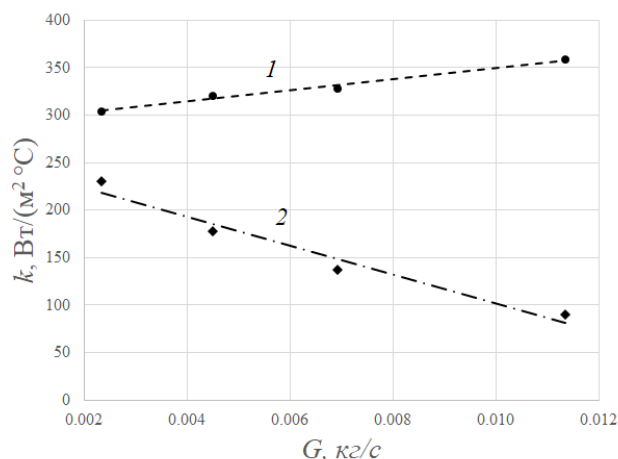


Рисунок 4 - Зависимость коэффициента теплопередачи k от расхода воды G и частоты вращения ротора мельницы n_r : 1 – 2000 об/мин, 2 - 3000 об/мин.

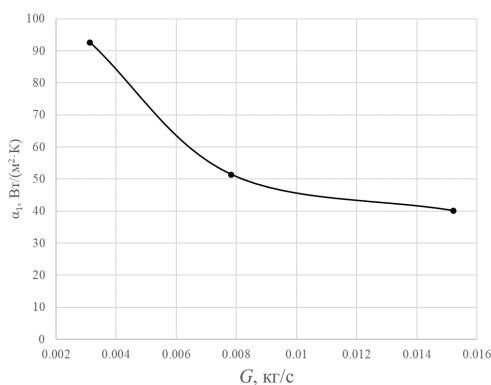


Рисунок 5 - Зависимость коэффициента теплоотдачи α от расхода меловой суспензии G .

Таким образом, с помощью данной методики были определены коэффициенты теплопередачи при измельчении конкретных продуктов с использованием бисерной мельницы. Также была произведена оценка коэффициента теплоотдачи со стороны измельчаемой суспензии.

Заключение

Предложенная методика показала свою работоспособность и может быть использована для оценки коэффициента теплопередачи бисерных мельниц, структура потока которых описывается диффузионной моделью.

Список литературы

1. Kwade A., Schwedes J. Wet Grinding in Stirred Media Mills. Handbook of Powder Technology. 2007. V. 12. P. 253-380. [https://doi.org/10.1016/S0167-3785\(07\)12009-1](https://doi.org/10.1016/S0167-3785(07)12009-1)
2. Taylor L., Skuse D., Blackburn S., Greenwood R. Stirred media mills in the mining industry: Material grindability, energy-size relationships, and operating conditions // Powder Technology. 2020. V. 369. P. 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.04.057>
3. Носов Г.А., Елиневская Л.С., Иванов Р.Н., Семеняченко А.А. Структура потоков бисерных мельниц // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2023. № 4. С. 8–11.
4. Nosov G.A., Elinevskaya L.S., Ivanov R.N. et al. Flow Structure of Bead Mills with a Centrifugal System for Separating Beads from a Crushed Suspension // Theor Found Chem Eng. 2024. V.58. P. 475–479. <https://doi.org/10.1134/S0040579524700787>
5. Guner G., Yilmaz D., Yao H. F., Clancy D. J., Bilgili E. Predicting the Temperature Evolution during Nanomilling of Drug Suspensions via a Semi-Theoretical Lumped Parameter Model // Pharmaceutics. 2022. V. 14. N. 12. P. 2840. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14122840>
6. Айнштейн В.Г. Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс: в 2 кн. / В. Г. Айнштейн, М. К. Захаров, Г. А. Носов [и др.]. 6-е изд. М.: Теревинф, 2015. 1758 с.

УДК 66.047.7

Исаев М.В., Кошелева М.К., Шалунов А.В.

Энергоресурсоэффективный способ сушки в химической технологии отделки тканей

Исаев Максим Владимирович – магистрант; isaev9mv@gmail.com.

Кошелева Мария Константиновна – к.т.н., доцент, профессор кафедры.

ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», Россия, Москва, 119071, ул. Малая Калужская д. 1.

Шалунов Андрей Викторович – д.т.н., доцент, заведующий кафедрой.

ФГБОУ ВО «БТИ АлтГТУ», Россия, Бийск, 659305, ул. имени Героя Советского Союза Трофимова, д. 27.

В тезисах рассмотрен защищённый патентом РФ способ сушки плотных шерстяных тканей с применением ультразвукового поля. Показана возможность сокращения продолжительности процесса сушки ткани специального назначения (сукно шинельное) при существенном понижении температуры сушильного агента за счёт интенсификации процесса ультразвуковым полем, при повышении производительности, снижении тепловых выбросов в рабочей зоне и в окружающую среду, снижении расхода электроэнергии и водяного пара при сохранении качества материала.

Ключевые слова: интенсифицированная сушка, ультразвук, специальная ткань, энергоресурсосбережение.

Energy-efficient drying method in chemical technology of fabric finishing

Isaev M.V.¹, Kosheleva M.K.¹, Shalunov A.V.²

¹The Kosygin State University of Russia, Moscow, Russian Federation.

²Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University.

The theses consider a method protected by a patent of the Russian Federation for drying dense woollen fabrics using an ultrasonic field. It is shown that it is possible to reduce the duration of the drying process for special-purpose fabrics (overcoat cloth) with a significant decrease in the temperature of the drying agent due to the intensification of the process by an ultrasonic field, while increasing productivity, reducing thermal emissions in the work area and into the environment, reducing energy consumption and water vapor while maintaining the quality of the material.

Key words: intensified drying, ultrasound, special fabric, energy conservation.

Введение

Тепловая сушка, являясь составной частью многих технологий, относится к числу наиболее энергоёмких процессов. По данным Комитета по сушке Российского Союза научных и инженерных общественных объединений (РосСНИО) затраты топливно-энергетических ресурсов на сушку составляют около 12% всех затрат энергии в промышленности и сельском хозяйстве, а в отделке тканей существенно больше.

Проблема повышения энергоресурсоэффективности рассматривается применительно к наиболее распространённой конвективной сушке тканей. Объектом сушки является шерстяная ткань высокой плотности, используемая как шинельное сукно и для изготовления средств индивидуальной защиты от воздействия кислот и от повышенных температур.

Для выбора способа и режима сушки и способа его интенсификации необходимо знание свойств материала как объекта сушки.

В известных работах кафедры ПАХТ МТИ имени А.Н. Косыгина, выполненных профессором Б.С. Сажиным с сотрудниками, показано, что важнейшей характеристикой высушиваемого материала является зависимость равновесного влагосодержания от относительной влажности воздуха при определённой постоянной температуре, т.е. изотермы сорбции-десорбции.

Установлено, что сорбционные свойства плоских текстильных материалов-тканей определяются свойствами волокон, из которых ткань изготовлена, поэтому в работе исследовались сорбционные свойства шерстяного волокна.

Изотермы десорбции, в частности, необходимы для определения конечного влагосодержания материала при его сушке, для определения условий его хранения, для расчёта кинетики процесса сушки и т.д. Сушка должна проводиться до влагосодержания, равновесного с окружающей средой помещения, в котором осуществляется процесс. Пересушивание ткани приводит к перерасходу энергии и ухудшению качества готовой ткани. Если ткань не досушивается, то во время её длительного хранения и транспортирования также возникнут проблемы с качеством ткани.

Экспериментально получена изотерма десорбции паров воды шерстяным волокном, из которого изготовлена изучаемая в работе шерстяная ткань. Использовался весовой сорбционный метод, который реализуется на вакуумной сорбционной установке с весами Мак-Бена-Бакра. Экспериментальная изотерма десорбции паров воды шерстяным волокном при 20°C представлена на рис.1.

Однако для определения равновесного влагосодержания материала в реальных условиях температурной сушки надо иметь изотермы десорбции при повышенных температурах. Экспериментальное получение изотерм при повышенных температурах возможно на специальных термостатированных установках, но связано со значительными трудностями. В работе проведён пересчёт данных по десорбции паров воды при 20°C на повышенные температуры – 50, 80, 100, 120, 140°C. Расчётные изотермы представлены на рис.1. Пересчёт на повышенные температуры проводился с использованием метода Пасса [1].

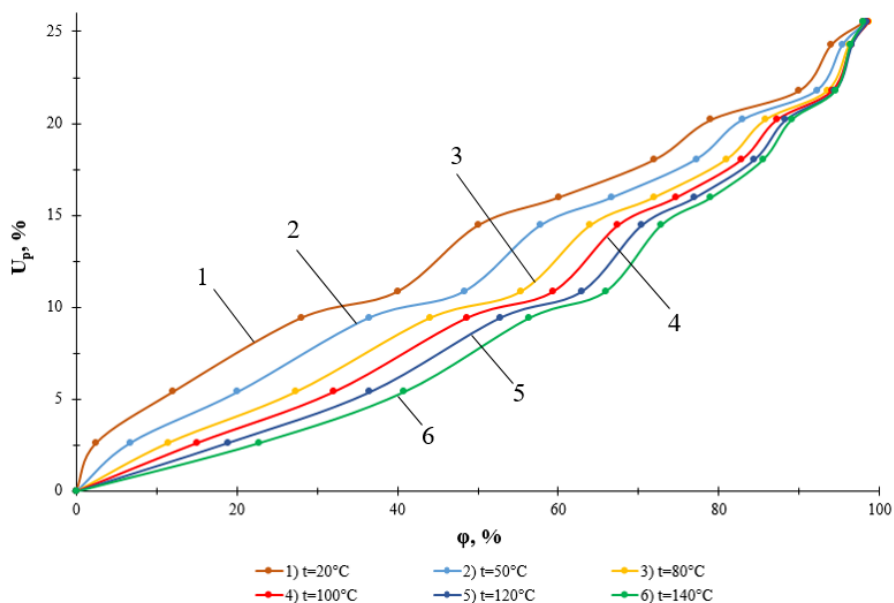


Рисунок 1 - Изотермы десорбции паров воды шерстяным волокном при различных температурах

В качестве интенсификатора процесса сушки суконных тканей выбрано воздействие ультразвукового поля, т.к. именно его применение является одним из современных методов интенсификации процесса сушки. Его главным преимуществом является возможность использования на существующих промышленных сушилках.

Современные способы интенсификации, в том числе ультразвуковое воздействие, позволяют свести к минимуму выбросы в биосферу как материальных, так и энергетических загрязнений, что даёт возможность усовершенствовать технологию сушки на действующем оборудовании при одновременном решении вопросов экологической и производственной безопасности [1, 3].

Экспериментальные исследования процесса сушки текстильных материалов проводились в Центре ультразвуковых технологий Бийского технологического института и в РГУ им. А.Н. Косыгина. В Центре был создан специальный стенд для изучения непрерывной акусто-конвективной сушки, поскольку для интенсификации процесса было выбрано ультразвуковое воздействие (УЗВ) [3]. Характеристики стенда, представленные в таблице 1, задавались с учётом параметров конвективных сушильных машин для плотных шерстяных тканей.

Таблица 1

Основные характеристики экспериментального стенда

Характеристики	Значения
Допустимая температура сушильного агента	80°C
Скорость движения ткани	0-0,3 м/с
Допустимая скорость сушильного агента на входе	8,5 м/с
Допустимая ширина ткани	110 мм
Массовый расход воды, обеспечивающей влагосодержание ткани	0-50 г/с

Экспериментальная часть

К недостаткам высокотемпературной конвективной сушки тканей относятся высокие энергозатраты, возможность усадки тканей из натуральных волокон и миграция красителей, печатной краски и аппретов, вероятность снижения прочности. При низких температурах увеличивается время сушки и снижается производительность [3].

На стенде получены экспериментальные кривые кинетики сушки плотной шерстяной ткани при различных температурах и разных скоростях сушильного агента, с УЗВ и без интенсифицирующего воздействия. Как видно из кривых кинетики, представленных на рис. 2, понижение температуры сушки до 80°C (в производственных сушилках 100-145°C) и снижение скорости сушильного агента до 6 м/с (вместо 8,5 м/с) при использовании ультразвука позволяет сохранять эффективность процесса. Рассчитаны зональным методом [3, 4], проанализированы и аппроксимированы опытные данные по зависимости коэффициента массопроводности от температуры и влагосодержания, необходимые для расчёта кинетики сушки плотных шерстяных тканей.

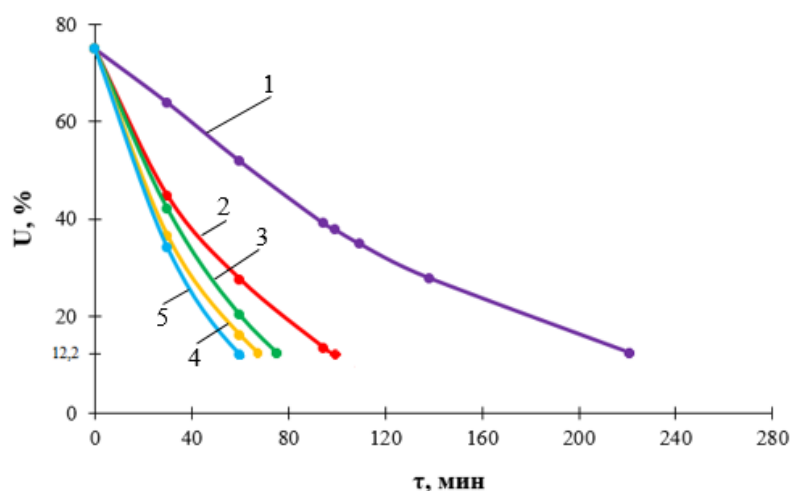


Рисунок 2 - Экспериментальные кривые кинетики сушки плотной шерстяной ткани при различных температурах и разных скоростях сушильного агента, с УЗВ и без интенсифицирующего воздействия
 1 – УЗВ, $T=20^{\circ}\text{C}$, $V=8,5$ м/с; 2 – $T=50^{\circ}\text{C}$, $V=8,5$ м/с; 3 – $T=80^{\circ}\text{C}$, $V=6$ м/с; 4 – УЗВ, $T=50^{\circ}\text{C}$, $V=8,5$ м/с; 5 – УЗВ, $T=80^{\circ}\text{C}$, $V=6$ м/с.

На основании анализа полученных экспериментальных данных разработан способ сушки, защищённый патентом [2]. Предлагаемым изобретением решается техническая задача получения текстильных изделий с высокой степенью сохранения их формы и улучшенной величиной потребительской усадки. Для решения поставленной задачи предлагается комплексное непрерывное воздействие на высушиваемый материал нагретого воздуха и ультразвука.

Технический результат достигается за счёт того, что способ сушки суконных тканей с применением ультразвукового поля заключается в непрерывном воздействии в сушильной камере на высушиваемую ткань плотностью 760-800 г/м² ультразвукового воздействия из десяти источников ультразвука с частотой ультразвукового колебания 20 кГц и амплитудой колебаний рабочего инструмента ≥ 70 мкм, с одновременной противоточной подачей со скоростью 6 м/с горячего воздуха, нагретого до температуры 80°C.

На рис. 3 приведена камера сушильно-ширильной машины с расположенными в ней источниками ультразвука.

В сушильную камеру (1) непрерывно противотоком подается нагретый до 80°C воздух со скоростью 6 м/с, при этом на ткань по пути её продвижения оказывается ультразвуковое воздействие из размещенных указанным способом источников ультразвука (3).

В этих условиях ткань полностью высушивается и достигает по показателю влагосодержания требования ГОСТ 3816-81 Полотна текстильные. Методы определения гигроскопических и водоотталкивающих свойств тканей [5]. Через самоклад (2) высушенная ткань складировается.

При способе непрерывной сушки плотных шерстяных тканей в сочетании с ультразвуковым воздействием понижается температура теплоносителя (воздуха) и уменьшается скорость воздуха, поступающего в сушилку. Процесс сушки проводится до достижения влагосодержания не более 12,2%, что отвечает требованиям ГОСТ и соответствует полученным в работе десорбционным изотермам [5]. Следует отметить, что при выбранных рациональных параметрах ультразвукового воздействия и использовании необходимых средств индивидуальной защиты негативного воздействия в рабочей зоне при использовании ультразвука для интенсификации не будет.

Проведенный анализ экономической эффективности от интенсификации процесса сушки при различной годовой производительности фабрики показывает, что при внедрении ультразвуковых аппаратов в действующую сушильно-ширильную машину будет происходить уменьшение затрачиваемой электрической энергии, так как продолжительность работы центробежных вентиляторов будет снижена. Также сократятся расходы тепла для нагревания воздуха за счёт понижения температуры сушильного агента.

При использовании десяти ультразвуковых излучателей время процесса сушки сократится на 65-70%.

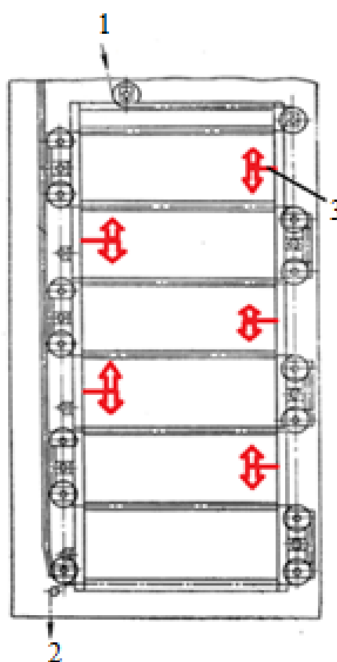


Рисунок 3 - Камера сушильно-ширильной машины (вид сверху)
1 - сушильная камера; 2 - самоклад; 3 - источники ультразвука.

Заключение

Получены изотермы десорбции паров воды при нормальных условиях и при повышенных температурах, которые необходимы для анализа объекта сушки и для выбора параметров процесса сушки.

На специально созданном стенде проведены экспериментальные лабораторные исследования кинетики сушки типовой плотной шерстяной ткани при различных температурных режимах с интенсификацией ультразвуковым воздействием и без него.

Разработан способ сушки, защищённый патентом [2], который может служить основой для модернизации действующих и создания новых промышленных установок для сушки плотных шерстяных текстильных материалов.

На действующих сушилках интенсификация ультразвуковым воздействием позволит сократить расход энергии и тепла, повысить производительность сушильного оборудования, уменьшить тепловые выбросы в рабочей зоне и в окружающую среду, при этом затраты на ультразвуковое оборудование окупятся достаточно быстро.

Список литературы

1. Акулич П.В. Расчёты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. – Минск: Белорусская наука, 2010. – 443 с. – ISBN 978-985-08-1192-9.
2. Патент № RU 2829479 Российская Федерация, МПК D06C 7/100 (2006.01). Способ сушки суконных тканей с применением ультразвукового поля: N 2023124488 : заявл. 22.09.2023: опубл. 30.10.2024 / Кошелева М.К., Шалунов А.В., Исаев М.В., Новикова Т.А. – 7 с.: ил.
3. Кошелева М.К., Шалунов А.В., Дорняк О.Р., Исаев М.В. Влияние ультразвука на кинетику непрерывной конвективной сушки плоских волокнистых материалов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2023. – Т. 29, № 2. – С. 263-271. DOI: 10.17277/vestnik.2023.02. pp.263-271.
4. Кошелева М.К., Рудобашта С.П. Влияние ультразвукового поля на кинетические коэффициенты в процессе экстрагирования. Инженерно-физический журнал. 2019. Т.92. № 5. С. 2404-2409.
5. ГОСТ 3816-81 Полотна текстильные. Методы определения гигроскопических и водоотталкивающих свойств тканей.

УДК 66-6

Исмаилов О.Ю., Исаматова Д.Н.

Сравнительный анализ биодизеля с традиционным дизельным топливом

Исмаилов Ойбек Юлибаевич – д.т.н. (DSc), старший научный сотрудник Института общей и неорганической химии АН РУз. 100170, г. Ташкент, ул. Мирзо Улугбека, 77а. ismoilovnmipi@mail.ru

Исаматова Джамила Нигматуллаевна - доктор философии технических наук (PhD), начальник отдела контроля за качеством образования Филиала РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина в городе Ташкенте. 100125, г. Ташкент, ул. Дурмон йули, 34. jamilyechka@mail.ru

Жураев Тулкинжон Эрмахаматович - Базовый докторант лаборатории «Процессы и аппараты химической технологии» Института общей и неорганической химии АН РУз. 100170, г. Ташкент, ул. Мирзо Улугбека, 77а.

В тезисе проведен сравнительный анализ биодизеля и традиционного дизельного топлива с учетом их экологических, технических и экономических характеристик. Он отличается низким содержанием серы, высокой степенью разложения и лучшей смазывающей способностью. Рассматриваются вопросы экономической эффективности использования биодизеля, включая его стоимость от производства и технологии производства. Авторы подчеркивают, что биодизель играет важную роль в снижении зависимости от природных видов топлива и обеспечения целей развития, однако для его широкомасштабного развития необходимо ограничение ряда технологических и экологических технологий.

Ключевые слова: дистилляция, углеводородная смесь, биодизель, возобновляемое сырьё, переэтерификация.

Comparative analysis of biodiesel with traditional diesel fuel

Ismailov O.Yu.¹, Isamatova D.N.², Jurayev T.E.¹

¹ Senior Researcher at the Institute of General and Inorganic Chemistry of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

² Head of the Department of Quality Control of Education at Gubkin Russian State University of Oil and Gas (SRU) in Tashkent

The thesis provides a comparative analysis of biodiesel and traditional diesel fuel, taking into account their environmental, technical and economic characteristics. It is characterized by low sulfur content, high degree of decomposition and better lubricity. The issues of the economic efficiency of using biodiesel, including its cost from production and production technology, are considered. The authors emphasize that biodiesel plays an important role in reducing dependence on natural fuels and achieving development goals, however, its large-scale development requires limiting a number of technological and environmental technologies.

Key words: distillation, hydrocarbon mixture, biodiesel, renewable raw materials, transesterification.

Введение

В современных условиях, характеризующихся необходимостью снижения негативного воздействия на окружающую среду и стремлением к устойчивому развитию, использование альтернативных видов топлива приобретает особую значимость. Одним из перспективных направлений в данной области является замена традиционных углеводородных видов топлива экологически чистыми альтернативами. Биодизель, как один из ключевых представителей таких видов топлива, является возобновляемым и экологически безопасным продуктом, получаемым из растительных масел или животных жиров. Он представляет собой важную часть стратегии сокращения выбросов парниковых газов и уменьшения зависимости от ископаемых источников энергии.

Состав и производство биодизеля

Традиционное дизельное топливо представляет собой углеводородную смесь, получаемую из нефти путем дистилляции. Оно характеризуется высокой энергетической плотностью, что обеспечивает эффективность в работе двигателей внутреннего сгорания, но также приводит к значительному выбросу вредных веществ в атмосферу. Биодизель, в свою очередь, состоит из метиловых или этиловых эфиров жирных кислот (FAME – Fatty Acid Methyl Esters), получаемых в процессе переэтерификации растительных масел или животных жиров.

Процесс переэтерификации представляет собой химическую реакцию масел с метанолом или этанолом в присутствии катализатора, в результате чего образуется биодизель и побочный продукт – глицерин. Наиболее распространенными источниками сырья для производства биодизеля являются:

- Подсолнечное, рапсовое и соевое масла;
- Жиры животных (например, свиное сало или куриный жир);
- Отработанные кулинарные масла.

Использование отходов в производстве биодизеля способствует снижению себестоимости и уменьшению нагрузки на окружающую среду.

Экологические преимущества и недостатки биодизеля

Одним из основных аргументов в пользу использования биодизеля является его экологичность. Биодизель имеет ряд преимуществ перед традиционным дизельным топливом:

- **Биологическая разлагаемость** – биодизель быстрее разлагается в природной среде, снижая риск загрязнения почвы и водоемов.
- **Низкое содержание серы** – выбросы оксидов серы (SOx), ответственных за кислотные дожди, значительно сокращаются.
- **Высокое содержание кислорода** – биодизель способствует более полному сгоранию, что снижает количество углеводородов и твердых частиц в выбросах.
- **Снижение выбросов CO₂** – благодаря углеродному циклу растений, используемых в производстве биодизеля, его применение способствует уменьшению парникового эффекта.

Однако существуют и недостатки:

- **Увеличение выбросов оксидов азота (NOx)** – по сравнению с традиционным топливом, биодизель может повышать концентрацию NOx в выхлопных газах, что требует дополнительных мер по их нейтрализации.
- **Экологические риски** – массовое выращивание культур, используемых для производства биодизеля, может привести к обезлесению, потере биоразнообразия и конкуренции за пахотные земли.

Технические характеристики и эксплуатационные свойства

Сравнительный анализ эксплуатационных характеристик показывает, что биодизель имеет как преимущества, так и определенные ограничения по сравнению с традиционным дизельным топливом:

- **Вязкость** – биодизель имеет более высокую вязкость, что может требовать модификации топливных систем в двигателях.
- **Энергетическая плотность** – биодизель имеет меньшую энергетическую плотность по сравнению с нефтяным дизелем, что может привести к увеличению расхода топлива.
- **Смазочные свойства** – биодизель обладает лучшими смазывающими свойствами, снижая износ двигателя и продлевая срок его службы.
- **Температура вспышки** – биодизель имеет более высокую температуру вспышки, что делает его более безопасным при транспортировке и хранении.

Использование биодизеля в чистом виде (B100) или в смеси с традиционным дизельным топливом (например, B20 – 20% биодизеля и 80% традиционного дизеля) позволяет учитывать как его преимущества, так и ограничения в зависимости от условий эксплуатации (рис.1).

Мировое производство биодизеля демонстрирует устойчивый рост в различных регионах.

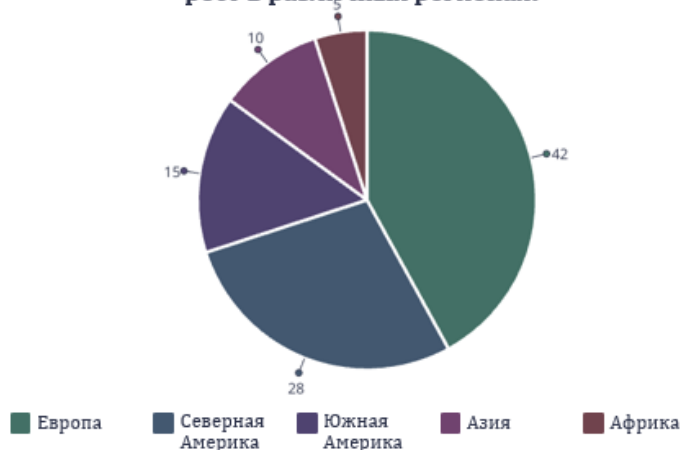


Рисунок 1 - Доля производимого в мире биодизеля

Экономические аспекты

Стоимость биодизеля варьируется в зависимости от ряда факторов:

- Цена на сырье (растительные масла, отходы жировой промышленности);
- Затраты на производство и транспортировку;
- Государственная поддержка и налоговые льготы.

В ряде случаев биодизель может быть дороже традиционного топлива, однако использование местного сырья и государственных субсидий может сделать его более экономически привлекательным. Дополнительные преимущества включают:

- Создание рабочих мест в сельском хозяйстве и перерабатывающей промышленности;
- Снижение зависимости от импорта нефти;
- Повышение энергетической безопасности страны.

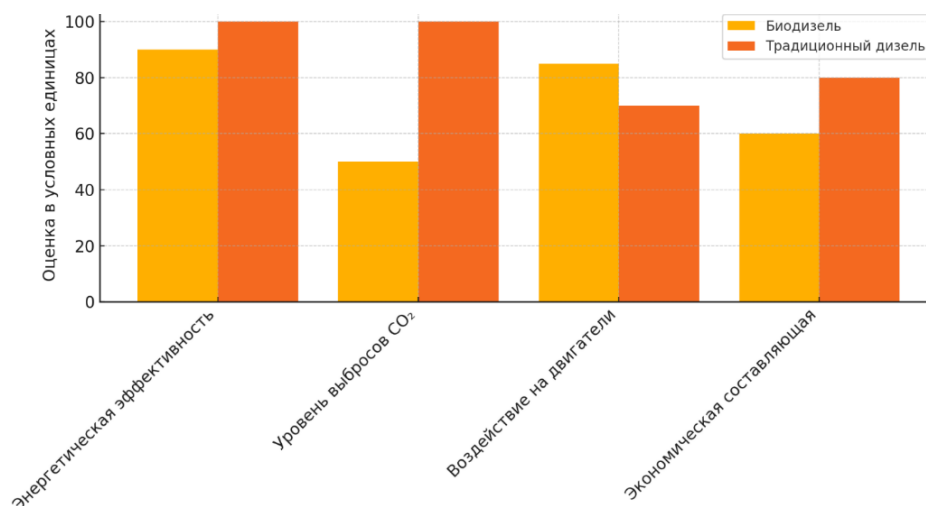


Рисунок 2 - Сравнительный анализ биодизеля с традиционным дизельным топливом

Заключение

Сравнительный анализ биодизеля (рис.2) и традиционного дизельного топлива показывает, что биодизель обладает значительными экологическими преимуществами, включая снижение выбросов CO₂, отсутствие серы и лучшую биологическую разлагаемость. Однако его широкое внедрение требует решения ряда технических и экономических вопросов, таких как уменьшение выбросов NO_x, повышение доступности сырья и снижение себестоимости производства.

Использование биодизеля может стать предпосылкой на пути к устойчивому развитию, особенно в странах, предоставляющих возможности для производства возобновляемого сырья. При комплексном подходе, включающем поддержку на государственном уровне, совершенствовании технологий переработки и оптимизации процессов с отказом от топлива, биодизель может стать альтернативой углеводородным видам топлива и вкладом в улучшение экологии.

Кроме того, дальнейшие исследования в области каталитических процессов, усовершенствование методов получения биодизеля и внедрение современных технологий очистки могут повысить его эффективность и минимизировать возможные негативные последствия. Развитие цепочки поставок биосырья, включая использование отходов сельского хозяйства и пищевой промышленности, может значительно повысить экономическую рентабельность биодизеля, что является предпосылкой его конкурентоспособности на мировом рынке.

Таким образом, биодизель обладает наибольшим потенциалом в качестве топлива будущего. Его внедрение требует комплексного подхода, включения научных исследований, инвестиций в инновационные технологии и поддержки на законодательном уровне. Только в этом случае можно добиться масштабного перехода на экологически чистые виды топлива и обеспечить долгосрочное устойчивое развитие.

Список литературы

1. Tulkinjon E. Juraev, Oybek Y. Ismailov, Abdugaffor M. Khurmamatov, Alisher U. Auesbaev, Djamila N. Isamatova, Jalolidin A. Muminov. COMPARATIVE ANALYSIS OF USED ENGINE OIL RECYCLING TECHNOLOGIES. <https://doi.org/10.62972/1726-4685.2025.1.31>

2. Жураев Т.Ж., Исмаилов О.Ю., Исаматова Д.Н. Технология утилизации отработанных моторных масел. // Журнал «ТАДҚИҚОТ ВА ИННОВАЦИЯЛАР», №5 (2024) стр 44-53 <https://zenodo.org/records/13837172>
3. Кондрашева Н.К., Еремеева А.М. Получение биодизельного топлива из растительного сырья // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 248-256. DOI: 10.31897/PMI.2022.15.
4. А.Ю. Кучкина, Н.Н. Сущик. Источники сырья, методы и перспективы получения биодизельного топлива. // Journal of Siberian Federal University. Biology 1 (2014 7) стр.14-42.
5. С.М. Каленская, А.В.Юник, В.П.Каленский, В.З.Макарявичене, Э.А.Сенджикене. Альтернативное растительное сырье для производства биодизеля. // Известия ТСХА, № 6 (2013) стр. 31-39.
6. С.П. Иванов, Технология производства биодизеля. // СПб.: Издательство Политехнического университета, 2019.
7. UNFCCC. (2015). Paris Agreement. United Nations Framework Convention on Climate Change.
8. Smith, A. B., et al. (2018). "Kinetic Modeling of Biodiesel Production via Esterification of Vegetable Oils." Journal of Chemical Engineering, 25(2), 123–135.

УДК 504.064.74

Назаров В.И., Макаренков Д.А., Калачева В.Р., Попов А.П.

Оценка ресурсного потенциала захороненных отходов Садонского свинцово-цинкового комбината (хвостохранилищ) и вопросы экологической безопасности

Назаров Вячеслав Иванович – к.т.н., доцент, заместитель начальника отдела;

Макаренков Дмитрий Анатольевич – д.т.н., доцент, первый заместитель руководителя КПХИ (ИРЕА) по научной работе;

Попов Александр Павлович – научный сотрудник.

НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»,

Россия, Москва, 123182, площадь Академика Курчатова, 1.

Калачева Виктория Радиковна – студент, victoriyakalaceva@gmail.com;

МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ,

Россия, Москва, 107023, Большая Семеновская, дом 38.

В тезисах рассмотрен вопрос переработки отходов хвостохранилищ. Выявлено, что в процессе переработки извлекается 90-95% ценных компонентов. Отходы, содержащие тяжелые металлы, отправляются на складирование. Увеличение эффективности извлечения металлов возможно через переработку захороненных отходов горно-обогатительных и горно-металлургических комбинатов. Эффективная утилизация таких отходов позволит снизить экологические риски и сэкономить средства на содержание хвостохранилищ. Используемые технологии переработки включают прямую переработку, комбинированные методы и гидрометаллургические процессы.

Ключевые слова: горно-обогатительные и горно-металлургические комбинаты, свинцово-цинковые руды, наилучшие доступные технологии, производства свинца, цинка и кадмия, хвостохранилища, экологическая безопасность.

Assessment of the resource potential of buried waste of the Sadonsky lead-zinc plant (tailings) and environmental safety issues

Nazarov V.I.¹, Makarenkov D.A.¹, Kalacheva V.R.², Popov A.P.¹

¹ SIC «KURCHATOV INSTITUTE», Moscow, Russian Federation

² MOSCOW POLYTECHNIC UNIVERSITY, Moscow, Russian Federation

The thesis considers the issue of tailings waste processing. It was found that 90-95% of valuable components are extracted during the processing. Waste containing heavy metals is sent for storage. Increasing the efficiency of metal extraction is possible through the processing of buried waste from mining and processing plants and mining and metallurgical plants. Effective utilization of such waste will reduce environmental risks and save money on the maintenance of tailings. The processing technologies used include direct processing, combined methods and hydrometallurgical processes.

Keywords: mining and processing plants and mining and metallurgical plants, lead-zinc ores, best available technologies, lead, zinc and cadmium production, tailings, environmental safety.

Введение

В настоящее время в горнорудной промышленности уменьшается количество разведанных запасов различных типов руд. В тоже время растут объемы первичной добычи руд различного значения. По технологии переработки руд в начале извлекаются из минерального сырья ценные компоненты в количестве (90-95) % масс. горной массы. Образовавшиеся отходы, затем отправляются на складирование в специально построенное хранилище. Переработка хвостов осуществляется на флотационных обогатительных фабриках. При этом потери металлов с хвостами переработки полиметаллических руд (в зависимости от выбранной технологии) в среднем составляют в % масс.: (7-11) свинца, (6-14) цинка, (5-7) меди, (23-27) серебра и (52-68) золота. Величина потерь благородных металлов так же зависит от полноты извлечения из минералов цветных металлов и железа.

Увеличение добычи ценных компонентов может быть обеспечено за счет промышленной переработки захороненных отходов обогатительных фабрик и горно-обогатительных и горно-металлургических комбинатов (ГОК) и (ГМК). На территории России можно выделить промышленные отходы передела руд ГОКами и ГМКами, которые расположены на территориях: Северного Кавказа (Тырныаузский, Садонский, Фиагдонский, Урупский, Лермонтовское производственное объединение «Алмаз»). По официальным данным, российские шламонакопители хранят около 8 млрд кубометров промышленных отходов различных классов опасности.

При работе ГМК общее количество образующихся в год в мире минеральных отходов составляет в среднем 25 млрд. тонн и в том числе по России 7 млрд. тонн или (38 – 40) %. Темп накопления образующихся отходов создает реальную экологическую угрозу для окружающей среды. Загрязнению подвергаются атмосфера, почва и водные ресурсы. [1].

Методы переработки ГОК и ГМК.

Известно, что промышленные отходы, содержащие тяжелые металлы, являются опасными источниками загрязнения окружающей среды. За длительное время хранения отходов происходит физико-химическая трансформация свойств материала. В результате изменяется их минерально-геохимический состав, сопровождающийся образованием разнообразных типов соединений. Образующиеся соединения обладают высокой миграционной способностью для проникновения в атмосферу, почву и водные ресурсы. В результате возникает проблема не только безопасного и экологически чистого складирования отходов, но и поиски технологий их полной утилизации. Эта технология должна обеспечивать предварительное извлечение из отходов как экономически ценных, так и экологически опасных металлов. В результате выбора оптимальной технологии переработки хвостохранилищ, возможно получение экологически чистого сырья для производства различных материалов и снизить экологическую нагрузку на окружающую среду.

Утилизация материалов хвостохранилищ позволит эффективно использовать недра и сохранять большие земельные участки. Это обеспечит экономию значительных средств, расходуемых на содержание хвостохранилищ.

В настоящее время при переработке отходов ГОК и ГМК используются следующие технологии:

1. Методы прямой переработки хвостов свинцово-цинковых руд.
2. Комбинированные методы переработки свинцово-цинковых руд с применением обжига.
3. Гидрометаллургический метод переработки свинцово-цинковых руд (СЦР).

В результате анализа наилучших доступных технологий (НДТ) производства свинца, цинка и кадмия была выбрана технологическая схема переработки СЦР с использованием совмещенных механических и массообменных процессами. [2].

Ниже приведена схема НДТ для получения в качестве целевых продуктов соединений ZnO , Pb , Ag , Cu , Cd , Co , Ni , Ti . (рис.1). [3].



Рисунок 1 - Упрощенная схема получения целевых продуктов из рудного концентрата первичного сырья.

Утилизация отходов проводится в следующем порядке. Готовая смесь может быть подготавливают путем отбора из систем бункеров-дозаторов с помощью ленточных весов или весового питателя непрерывного действия. Окончательное смешивание и усреднение происходит в миксерах или в конвейерных и дозирующих системах. Для мелкодисперсных материалов используются закрытые конвейеры или пневматические системы транспортировки. Концентраты перемешиваются, чтобы получить однородную смесь. Поэтому на практике проводят отбор и анализ проб для разделения и отдельного хранения концентратов по группам, чтобы получать готовую смесь перед обжигом. Для создания хорошего кипящего слоя применяются специальные правила подготовки смеси перед обжигом или агломерацией. После подготовки смеси выделяются следующие основные этапы процесса: (обжиг, подготовка огарка, выщелачивание, очистка,

электролиз). [4]. Один из вариантов аппаратурно-технологической схемы переработки цинкового концентрата представлен на рис. 2.

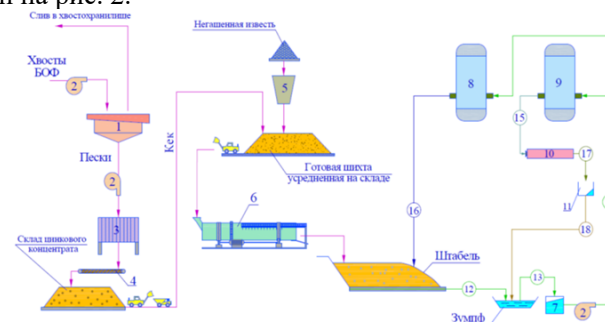


Рисунок 2 - Аппаратурно-технологическая схема: 1 – сгуститель рамного типа; 2 – насос; 3 – дисковый вакуум-фильтр; 4 – конвейер обезвоженных хвостов для их подачи на склад цинкового концентрата; 5 – мельница сухого помола; 6 – барабанный окомкователь; 7 – емкость продуктивного раствора; 8, 9 – напорные емкости выщелачивающего и продуктивного раствора; 10 – цементатор; 11 – емкость для цементной меди с переливом; 12-18 – трубопроводы рабочих растворов.

Опытная аппаратурно-технологическая схема работает следующим образом. Обезвоживание хвостов обогащения было предложено производить на фабрике с использованием незадействованной на тот момент линии обезвоживания цинкового концентрата. Так как влажность обезвоженных хвостов при этом была выше рекомендованной 8%, поэтому хвосты подвергались дополнительной сушке на складе при перемешивании погрузчиком.

Окомкование производилось в барабанном окомкователе. Перемешивание компонентов смеси, подача ее в окомкователь, прием окатышей на выходе и формирование штабеля осуществлялось вручную.

Исследование режимов и параметров окомкования производилось в течение 2 недель. При этом варьировался расход вяжущего (извести), подбирался оптимальный расход воды. Проводили перемешивание компонентов смеси, дозирование ее в окомкователь, подачу воды из трубопровода и окомкованное сырье складировали на площадку. Очистка внутренней поверхности барабана окомкователя от налипшего материала производилась вручную.

Опытным путем установлено, что рациональный расход вяжущего – пыли известково-доломитового производства составляет 3% от общего объема смеси, что ниже установленного в лабораторных условиях расхода - 5%. Разница расхода в лабораторном и опытно-промышленном окомкователе определяется режимными параметрами процесса окомкования в промышленном аппарате. Расход воды, необходимый для окомкования хвостов обогащения составил $0,125 \text{ дм}^3$ на 1 кг смеси, что также ниже установленного в лабораторных условиях ($0,2 - 0,25$) дм^3 . Важным условием получения прочных, крупных окатышей является струйная периодическая подача воды в окомкователь, а не разбрызгивание. Ранее рекомендованный угол наклона барабана окомкователя 4-6 град. не обеспечивал интенсивное продвижение окатышей к разгрузочному концу и тем самым приводил к увеличению продолжительности окомкования. В результате был выбран, угол наклона 8 град. который обеспечивает режим окатыwania требуемую степень уплотнения окатышей.

Укладка окомкованного материала в кучу производилась по мере окомкования. После формирования массива и выдержки окатышей в течение 3 суток, из различных точек штабеля отбирали гранулы для испытаний их на физико-механические и фильтрационные свойства. При определении физико-механических характеристик сухие окатыши взвешивались, производился замер их диаметра, испытание на прочность путем сжатия на гидравлическом прессе.

Прочность окатышей варьировалась в пределах (2 – 5,5) МПа. При этом средняя прочность составила 3,7 МПа. После хранения в течение 2 недель структурная прочность сжатия окатышей существенно увеличилась, что объясняется протеканием твердо-фазных реакций в гранулах. Результаты прочностных характеристик окатышей в опытно-промышленных испытаниях оказались выше, чем получены в лабораторных исследованиях, когда окатыши имели максимальную прочность (1,25 – 1,3) МПа. Это позволяет в 4 раза увеличить высоту штабеля окатышей, как для кучного выщелачивания окомкованных хвостов, так и для их сухого хранения. [5].

Необходимо заметить, что экологически опасные элементы (As, Cd, B, Ni, Pb, Zn, и др.) постоянно поступают из хвостохранилища, шахтных вод рудников Садонского комбината и боковых притоков р. Садонка, Архон, Унал-дон в воду р. Ардон. Это приводит к ее постоянному загрязнению и накоплению тяжелых металлов.

Заключение

Анализируя полученные данные о химическом составе лежалых хвостов с поверхности хвостохранилища и с глубин до 9м, можно увидеть, что превышения норм ПДК значительно выше на поверхности хвостохранилища, нежели чем на глубине 9м. Например, в пробе с поверхности превышения норм ПДК для элемента Zn возрастает в 2400 раз, а в скважине №1 на глубине 9м - в 140 раз. Так же в пробе с поверхности для элемента Pb превышения норм ПДК возрастает примерно в 2700 раз, а на глубине 9м в скважине №1 – в 70 раз.

Это может свидетельствовать об изменении технологии переработки руды, или смены типов руд на обогатительной фабрике, что приводит к недостаточному извлечению полезных ископаемых и образованию хвостов с повышенной концентрацией приведенных элементов, а, следовательно, и повышения класса опасности самого хвостохранилища.

Список литературы

1. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н., Цупкина М. В. Оценка влияния гипергенеза в хранилищах отходов переработки медно-колчеданных руд на выбор технологических схем их разработки //Изв. ТулГУ. Науки о Земле. - 2023. - Вып. 2. – с. 283-299.
2. Назаров В. И. Техника и технология совмещенных процессов переработки твердых отходов: учебное пособие/В.И. Назоров, Р.А. Санду, Д.А. Макаренков, Н.Е. Николайкина – Москва: ИНФРА-М, 2020. -456 с. – (Высшее образование: Бакалавриат).
3. Бюро НДТ. ИТС 13 – 2020 Производство свинца, цинка и кадмия. Москва, с. 258.
4. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н., Милкин Д.А., Звягинцев А.Г. Исследование процессов выщелачивания ценных компонентов из текущих хвостов обогащения серно-колчеданных руд/Журнал Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)//Семинар № 25 – 2010. – с. 256-268.
5. Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Энергоэффективные и безопасные технологии разведки и разработки техногенных образований/Журнал Горная промышленность//Горная Промышленность №3 (139) – 2018. – с. 86-90.

УДК 661.15

Калгашкин Н.И., Вязьмин А.В., Разин С.А., Таран Ю.А., Стрельникова В.О., Фуфаева В.М., Власова А.М.

Технологии получения современных видов удобрений пролонгированного действия

Калгашкин Никита Игоревич – аспирант;

Вязьмин Андрей Валентинович – д.физ.-мат.н., заведующий кафедрой;

ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет»

Россия, Москва, 119571, Проспект Вернадского, д. 86

Разин Сергей Андреевич – аспирант;

Таран Юлия Александровна – д.т.н., доцент кафедры; taran_yu@mirea.ru

ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет»

Россия, Москва, 119571, Проспект Вернадского, д. 86

Стрельникова Виктория Олеговна – преподаватель;

ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет»

Россия, Москва, 119571, Проспект Вернадского, д. 86

Фуфаева Валентина Михайловна – преподаватель;

ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет»

Россия, Москва, 119571, Проспект Вернадского, д. 86

Власова Анастасия Михайловна – студент.

Рассмотрены некоторые современные виды удобрений пролонгированного действия и способы их получения. Основное внимание сфокусировано на многослойных удобрениях, полученных по технологии окатывания и формуляциях матричного типа. В качестве активной минеральной составляющей использовалось NPK удобрение с соотношением компонентов 16:16:16. Получены лабораторные образцы удобрений и определены их основные показатели качества. Актуальность работы обусловлена тем, что удобрения пролонгированного действия положительно влияют на урожайность культур и сокращают ущерб, наносимый экологии.

Ключевые слова: удобрения пролонгированного действия, капсулированные удобрения, матричные удобрения, NPK

Technologies for obtaining modern types of slow release fertilizers

Kalgashkin N.I., Vyazmin A.V., Razin S.A., Taran Yu.A., Strelnikova V.O., Fufaeva V.M., Vlasova A.M.

MIREA — Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

Some modern types of slow release fertilizers and methods of their production are considered. The main focus is on multi-layered fertilizers obtained by pelletizing technology and matrix-type formulations. An NPK fertilizer with a component ratio of 16:16:16 was used as the active mineral component. The relevance of the work is due to the fact that slow release fertilizers have a positive effect on crop yields and reduce the damage caused to the environment.

Keywords: slow release fertilizers, encapsulated fertilizers, matrix fertilizers, NPK

Введение

Традиционные минеральные удобрения, такие как NPK, аммиачная селитра и карбамид, широко применяются в сельском хозяйстве, создавая при этом проблемы, обусловленные низкой эффективностью использования питательных веществ и неблагоприятным воздействием на окружающую среду. Современный подход, направленный на ведение более эффективного и экологичного сельского хозяйства, подразумевает развитие технологий получения удобрений пролонгированного действия разных типов, свободных от этих недостатков [1,2]. В [3] было продемонстрировано, что применение удобрений пролонгированного действия улучшает минеральное питание растений на длительный срок - от 3 до 18 месяцев - всего за одно применение. Помимо повышения эффективности использования и минимизации ущерба окружающей среде, такие виды удобрений повышают качество урожая и урожайность [4,5]. Кроме широко распространенных капсулированных удобрений пролонгированного действия, следует обратить внимание на менее распространенные многослойные гранулы и удобрения матричного типа [6-9]. Многослойные гранулы имеют сложную структуру и представляют собой минеральное ядро, на которое в тарельчатом грануляторе по технологии окатывания наносилось два или более функциональных слоя покрытия. Формуляции матричного типа представляют собой инертную фазу носитель, в объеме

которой распределены дискретные образования минерального удобрения. Активное вещество, при этом, диспергируется в матрице и при контакте с водой диффундирует через поверхность матрицы или через поры и каналы в фазе-носителе. (рис. 1).

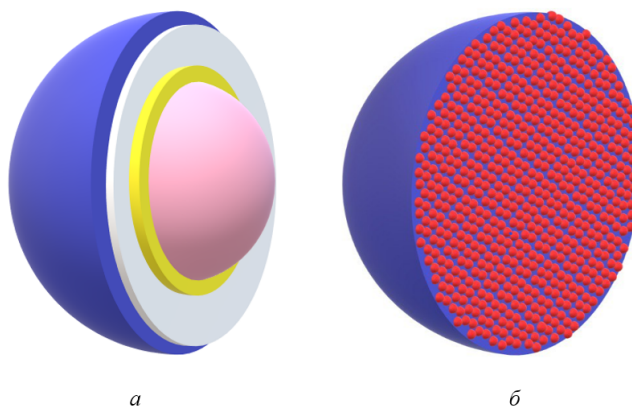


Рисунок 1 - Удобрения пролонгированного действия: а — многослойная гранула; б — гранула матричного типа.

Экспериментальная часть

Выполнены серии экспериментов по получению в лабораторных условиях как многослойных гранул, так и удобрений матричного типа.

Многослойные гранулы были получены на лабораторной установке, основным элементом которой является тарельчатый гранулятор, описанный в [7]. На минеральное ядро, представляющее собой приллированный NPK с соотношением компонентов 16:16:16 наносился первый слой покрытия, функциональным назначением которого было обеспечение пролонгированного эффекта удобрения. Для этого слоя использовались различные составы, в том числе на основе серы, парафина и полиэтиленового воска. Затем наносился второй слой покрытия, состоящий из микроорганизмов, инокулированных на крахмале, наносимых с помощью связующего. В качестве функциональных добавок в ряде опытов в слой вводили желатин и фосфогипс. Для третьего слоя использовался состав на основе стеариновой кислоты. Его назначение – защита второго слоя от попадания влаги из атмосферы и конденсата. Внешний слой необходим, поскольку микроорганизмы активируются при контакте с влагой, а преждевременная активация до внесения в почву может привести к разрушению гранул.

При размере исходных гранул NPK порядка 2-3 мм размер гранул продукта получался в диапазоне 4-6 мм. Измерения статической прочности производились на приборе ИПГ - 1М по стандартной методике, описанной в ГОСТ 21560.2–82. Средняя прочность гранул для всех рассмотренных комбинаций составов превышает 15 Н. Пролонгированный эффект оценивался по кинетическим кривым, построенным на основе экспериментальных данных. Опыты по частичному растворению выполняли в непроточной закрытой ячейке. Концентрацию раствора определяли рефрактометрически, для контрольных опытов ионометрически. Отбор проб проводили с возвратом в ячейку. Лабораторные микробиологические испытания полученных многослойных гранул показали, что количество жизнеспособных микроорганизмов составляет порядка $1,0 \cdot 10^7$ КОЕ/г, а значит они хорошо переносят технологический процесс грануляции. Пролонгированный эффект для такого вида удобрений варьируется в широком диапазоне в зависимости от состава и массовой доли первого слоя покрытия, а значит удобрение может быть кастомизировано в зависимости от потребностей конкретной культуры. На рисунке 2 изображены образцы полученных многослойных гранул.



Рисунок 2 - Образцы многослойного удобрения пролонгированного действия на основе NPK 16:16:16

Удобрения матричного типа были получены на основе того же приллированного NPK 16:16:16. Поскольку технологический процесс подразумевает измельчение минеральной составляющей, использовалась мелкая фракция с размером гранул до 2 мм. В случае реализации процесса на действующем производстве минеральных удобрений в качестве сырья можно использовать отсев из блока классификации существующих технологических схем производства. В качестве материала матрицы использовались парафин, полиэтиленовый воск и смешанные составы. Гранулы получали формованием, помещая суспензию, где дискретная фаза – измельченное NPK, а сплошная фаза – расплав описанных выше составов в формы для охлаждения. Процесс суспензирования проводился при постоянной температуре с непрерывным перемешиванием механической мешалкой. Температуру подбирали таким образом, чтобы NPK находился в твердом состоянии, при этом расплав матрицы обладал минимальной вязкостью. Варьируемыми параметрами были тонина помола, массовая доля и состав матрицы, температура отверждения, размер гранулы.

После получения гранул проводилось их микроскопическое исследование, которое позволяло оценить равномерность распределения дискретной фазы в объеме матрицы; измерение статической прочности по стандартной методике и опыты по определению пролонгированного эффекта. Стоит отметить, что такая технология позволяет получить монодисперсный гранулометрический состав удобрений, гранулы имеют правильную сферическую форму и гладкую поверхность. Статическая прочность образцов зависит от состава и массовой доли матрицы. На рисунке 3 приведено изображение полученного нами продукта.

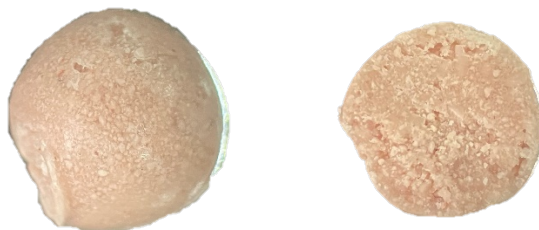


Рисунок 3 - Образцы удобрения матричного типа на основе NPK 16:16:16 с матрицей из парафина.

В дальнейшем планируется проведение серии опытов для получения матричного типа удобрений на охлаждаемых поверхностях. Замена способа производства позволит повысить производительность, снизив при этом себестоимость продукции.

Заключение

Получены образцы новых удобрений пролонгированного действия по технологиям окатывания и формования. Определены их показатели качества и основные параметры, оказывающие на них влияние.

В случае многослойных гранул органический субстрат и микроорганизмы, инокулированные на крахмале, способствуют поддержанию и повышению плодородия почвы, а также увеличивают усвояемость питательных веществ растениями. Такой вид удобрений рекомендован для использования на пахотных землях, склонных к истощению и подверженным эрозии. Входящий в состав удобрений крахмал обладает гидрофильными свойствами, способствует аккумуляции вокруг

гранул удобрения молекул воды, что особенно важно при их использовании в регионах, где могут возникать периоды засухи.

Матричные гранулы интересны в том аспекте, что в большинстве случаев удобрения пролонгированного действия представлены капсулированными гранулами, полученными по технологии окатывания в барабанных и тарельчатых грануляторах или в псевдоожиженном слое. Получение матричных удобрений не требует агрегатов большой единичной мощности и масштабных систем очистки выбросов, а значит может быть реализовано на малотоннажных производствах. При этом, свойства гранул в части пролонгированного эффекта и статической пучности сопоставимы с капсулированными удобрениями.

Предложенные варианты удобрений пролонгированного действия являются перспективными, поскольку не имеют аналогов на мировом рынке и планируются дальнейшие работы по усовершенствованию технологий их получения и масштабированию производства с целью повышения производительности для перехода от лабораторных к промышленным технологическим производства таких удобрений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Государственного задания № FFSZ - 2023-0003.

Список литературы

1. Фуфаева В.М., Таран Ю.А., Стрельникова В.О. Удобрения пролонгированного действия – новый этап развития рынка удобрений (обзор) // Химическая технология. 2024. Т. 25. №3. С. 86-95.
2. Controlled-release fertilizer: Recent developments and perspectives / S. Govil, N.V. Duc Long, M. Escribà-Gelonch, V. Hessel // Industrial Crops and Products. 2024. V. 219. P. 1-18.
3. Vejan P., Khadiran T., Noraini A. Controlled release fertilizer: A review on developments, applications and potential in agriculture // Journal of Controlled Release. 2021. V. 339. P. 321–334.
4. Elaheh M., Marzieh S., Mehri S. Improvement of tomato yield and quality using slow release NPK fertilizers prepared by carnauba wax emulsion, starch-based latex and hydrogel nanocomposite combination // Scientific Reports. 2023. V. 13 (1). P. 1–17.
5. Slow-release nitrogen fertilizers enhance growth, yield, NUE in wheat crop and reduce nitrogen losses under an arid environment / Ghafoor I., et al. // Environ Sci Pollut Res Int. 2021. № 28 (32). P. 43528–43543
6. Qu Z., Qi X. Reduced n fertilizer application with optimal blend of controlled-release urea and urea improves tomato yield and quality in greenhouse production system / Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 2020. V. 20 (4). P. 1741–1750.
7. Экологически безопасные органоминеральные биоактивированные удобрения / В.М. Фуфаева, Ю.А. Таран, В.О. Стрельникова, Н. И. Калгашкин, А. В. Вязьмин, А. К. Карганян, О. Т. Панасюк // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2024. Т. 30 № 3. С. 462-470.
8. Гранула органоминерального биоудобрения пролонгированного действия: пат. 223921 Рос. Федерация: МПК C05G 3/00, C05G 3/40 / Карганян А.К., Панасюк О.Т., Таран Ю.А., Фуфаева В.М., Стрельникова В.О.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Научно Производственный Центр «Биофактор». – № 2023102550; заявл. 06.02.2023; опубл. 06.03.2024, Бюл. № 7. – 8 10 с.
9. Многослойное удобрение пролонгированного действия с покрытиями на основе серы и битума и способ его получения: пат. 2824519 Рос. Федерация: МПК C05G 5/30, C05D 9/02, C05C 9/00, C05C 1/00, C05G 1/00, C05G 3/00 / Таран Ю.А., Фуфаева В.М., Стрельникова В.О.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет». – № 2023118161; заявл. 10.07.2023; опубл. 08.08.2024, Бюл. № 22. – 14 с.

УДК 665.521.7

Карабасова Н.А., Кайрлиева Ф.Б., Базарова Ж.С.

Изучение модернизации установки замедленного коксования Атырауского НПЗ

Карабасова Нагима Асылбековна – докторант; n.karabasova@aogu.edu.kz.

Кайрлиева Фазилат Басаровна – к.т.н., старший преподаватель ИНХИиЭ имени Надирова Н.К.;
F.Kairlieva@aogu.edu.kz.

Базарова Жаркынай Сериковна – магистрант, zh.bazarova@aogu.edu.kz

НАО «Атырауский университет нефти и газа имени С.Утебаева, Казахстан, Атырау, 060027, ул. Баймуханова 45 а.

В тезисах рассмотрено усовершенствование установки замедленного коксования на Атырауском нефтеперерабатывающем заводе, рассчитан выход продуктов коксования до и после реконструкции установки, и выданы рекомендации для ее бесперебойной работы.

Ключевые слова: замедленное коксование, реконструкция оборудования, глубина переработки нефти.

Study of modernization of the Atyrau Oil Refinery's delayed coking unit

Karabassova N.A., Kairliyeva F.B., Bazarova Zh.S.

Atyrau Oil and Gas University named S.Utebayev, Atyrau, Kazakhstan

The theses examine the improvement of the delayed coking unit at the Atyrau Oil Refinery, and calculate the yield of coking products before and after the reconstruction of the unit, recommendations were issued for its smooth operation.

Key words: delayed coking, equipment reconstruction, oil refining depth.

Введение

Нефтегазовый комплекс выполняет незаменимую роль в обеспечении жизнедеятельности современного человека, а также в развитии регионов и страны в целом. На сегодняшний день продолжается активное использование нефти, газа и продуктов их переработки, как первичных, так и вторичных. Такие продукты, как асфальты, битумы, кокс и другие, активно используются в строительной, металлургической промышленности [1].

Одним из важных вторичных продуктов нефтепереработки является кокс, который крайне необходим для металлургической промышленности, поэтому развитие процессов получения кокса, в том числе и методом замедленного коксования, привлекает внимание исследователей [2].

Замедленное коксование – процесс переработки тяжёлого нефтяного сырья и высокоароматизированных дистиллятов, осуществляемый на нефтеперерабатывающем производстве, представляющий собой «замедленный» термоллиз при температуре от 490 до 510 °С, протекающий под давлением до 0,55 МПа, целевым назначением которого может быть как производство нефтяного кокса различного назначения, так и суммы дистиллятов, в частности бензиновой фракции, легкого и тяжелого газойлей коксования [3].

Значимость исследований процессов получения нефтяных коксов объясняется ростом производства высоколегированных сталей, цветных металлов, электроэнергии, развитием атомно-энергетического комплекса и других отраслей техники, в которых используется нефтяной кокс, поэтому изучение данной проблемы является важным и актуальным в настоящий период [1].

Процесс замедленного коксования является наиболее рентабельной и перспективной технологией переработки тяжелых нефтяных остатков [4]. Нефтеперерабатывающие заводы, в составе которых есть установка замедленного коксования, можно отнести к заводам с безотходной технологией переработки нефти и газа [5].

В состав установки замедленного коксования входят секции коксования, фракционирования, блок печей, блок выгрузки кокса, блок разделения газа и нефти, узел улавливания вредных выбросов, узел очистки воды, отделенной от нефтяного кокса, система внутриустановочной обработки кокса, система компримирования и подачи жирного газа. Секция коксования состоит из печи и четырех параллельно работающих реакторов для обеспечения непрерывности процесса. Основными направлениями для оптимизации процесса замедленного коксования можно считать: изменения состава сырья, усовершенствование фракционирующей колонны установки замедленного коксования, модернизация печей – наиболее ресурсоемкого элемента установки [5].

В Казахстане установки замедленного коксования функционируют на Павлодарском нефтехимическом заводе в городе Павлодар и на Атырауском нефтеперерабатывающем заводе в городе Атырау.

Установка замедленного коксования Павлодарского НХЗ входит в состав производства переработки тяжелых нефтяных остатков. Данная установка введена в эксплуатацию в 1987 году и прошла реконструкцию в 2016 году. Это позволило увеличить мощность переработки гудрона с 600 тысяч тонн до 925 тысяч тонн в год и выпуск кокса со 120 тысяч до 280 тысяч тонн в год [6].

Установка замедленного коксования Атырауского нефтеперерабатывающего завода была спроектирована институтом Башгипронефтехим (г.Уфа), привязка к общезаводскому хозяйству выполнена институтом АзГипроНефтехим (г. Баку). Установка предназначена для получения кокса из тяжелых остатков переработки нефти (гудрон, мазут), служащего сырьем в производстве электродов для алюминиевой промышленности и была введена в эксплуатацию в 1980 году [7].

Проектная годовая производительность установки по сырью составляет 600 тысяч тонн в год и обеспечивает выработку 120 тысяч тонн кокса в год, в результате модернизации производительность установки по сырью была доведена сначала до 720 тысяч тонн в год. Был произведен монтаж блока аминовой очистки, предназначенный для очистки жирного газа коксования от серосодержащего соединения водным раствором диэтаноламина.

Также проведена реконструкция установки замедленного коксования с целью увеличения производительности установки на 1000 тысяч тонн в год, и была внедрена система микропроцессорного управления технологического процесса [8].

Установка замедленного коксования Атырауского нефтеперерабатывающего завода выпускает следующую продукцию [9]:

- жирный газ, используемый в качестве топлива на технологических объектах завода;
- бензин коксования;
- легкий газойль;
- тяжелый газойль;
- кокс суммарный.

Авторы провели анализ данных [10] о реконструкции установки с заменой морально и физически устаревшего оборудования и введением современных конструктивных и технологических решений.

На блоке колонн была произведена замена внутренних устройств в колоннах К-1, К-2, К-3, К-4 на фиксированные клапанные тарелки фирмы «Koch-Glitsch» и произведен монтаж емкости С-100 для улавливания коксовой пыли из реакторов Р-1/4.

На реакторном блоке были выполнены следующие виды работ:

- замена шлемовых линий из реакторов в колонну К-1 и емкость Е-8/9;
- замена запорной арматуры выхода паров реакторов на отсекающие клапана фирмы «Mogas» с электроприводами;
- замена четырехходовых и проходных кранов реакторов Р-1/4;
- монтаж узла подачи антипенной присадки в реактора.

На блоке печей была произведена замена горелочных устройств печей П-1/4, и был сделан монтаж системы противоаварийной защиты.

С целью исключения выбросов вредных веществ в атмосферу была проведена модернизация блока улавливания паров прогрева и пропарки коксовых камер.

По результатам фиксированного пробега с целью определения проектных показателей после реконструкции была достигнута суточная производительность установки на уровне 2 946 тонн в сутки, что соответствует переработке около 1 млн. тонн в год при работе на двухгодичном межремонтном периоде.

В таблице 1 приведены данные материального баланса установки замедленного коксования до и после реконструкции, из которых следует, что после проведенной реконструкции установки помимо увеличения производительности до 928000 тонн в год, увеличен выход кокса с 127500 тонн до 177250 тонн и выход светлых нефтепродуктов (бензина и легкого газойля) с 414000 до 495550 тонн.

Таблица 1

Выход продукции установки коксования

до реконструкции		
Наименование потоков	%	тыс. т/год
Сырье – гудрон	100,0	750,0
Получено:		
Жирный газ	5,8	43,5
Бензин коксования	14,2	106,5
Легкий газойль	41,0	307,5
Тяжелый газойль	22,0	165
Кокс сырой	17,0	127,5
после реконструкции		
Сырье:		
Гудрон	93,75	870,0
Тяжелый газойль с АВТ	6,25	58,0
Получено:		
Жирный газ	6,6	61,25
Бензин коксования	17,3	160,55
Легкий газойль	36,1	335,00
Тяжелый газойль	20,9	193,95
Кокс нефтяной	19,1	177,25

Таким образом, была увеличена доходность предприятия за счет получения дополнительных объемов целевых нефтепродуктов с добавленной стоимостью и увеличения глубины переработки, а также достигнуто улучшение экологической обстановки за счет снижения сбросов с установки на очистные сооружения.

Основными направлениями по совершенствованию процесса замедленного коксования являются улучшение технико-технологических показателей, экологической обстановки и повышение качества продуктов.

Реакторы являются основными аппаратами установок замедленного коксования (УЗК). В них происходит формирование и накопление нефтяного кокса - целевого продукта процесса, и, следовательно, правильно сконструированный аппарат определяет технико-экономические показатели работы установки в целом [11].

Реакторы являются основными аппаратами установок замедленного коксования (УЗК). В них происходит формирование и накопление нефтяного кокса - целевого продукта процесса, и, следовательно, правильно сконструированный аппарат определяет технико-экономические показатели работы установки в целом. Опыт эксплуатации показывает, что высота реакторов порядка 30 м является предельной, так как при большей высоте возникают трудности в работе оборудования по выгрузке кокса, связанные со значительным поперечным отклонением резака внутри реактора, разбалансировкой штанги и системы полиспадов, вибрацией буровых металлоконструкций.

Поэтому, объем реакторов необходимо повышать за счет увеличения диаметра. Отношение высоты реактора к его диаметру целесообразно иметь в пределах 3,5-4,0. Современная тенденция увеличения диаметров реакторов, а, следовательно, и мощностей УЗК объясняется сокращением удельных капитальных и эксплуатационных затрат. Так, затраты на строительство установок замедленного коксования с двумя реакторами диаметром 7 м на 30-40% меньше, чем установки той же мощности с четырьмя реакторами диаметром 4,6-5,5 м [11, 12].

Для бесперебойной и безаварийной работы установки, учитывая увеличение производительности сырья, непосредственно на рассматриваемом предприятии возможно выполнять следующие рекомендации [5]:

1. Ежегодно производить остановку установки для проведения профилактических работ, а также проведение процесса паровыжиг трубных змеевиков печи подогрева вторичного сырья П-2/3.
2. Необходимо предусмотреть проведения процесса декоксофикации с последующей диагностикой трубных змеевиков печи подогрева вторичного сырья П-2/3 периодичностью один раз в 4 - 5 лет.
3. Произвести замену существующих реакторов Р-1/4 на реакторы с увеличенным объемом.

4. Произвести установку фильтров по вторичному сырью, легкому газойлю, бензину, для очистки продукта от коксовой пыли.

5. Строительство градирни на очистных сооружениях установки замедленного коксования для эффективного повторного использования очищенной воды для технологических нужд.

Список литературы

1. Бикбулатова А.М. Этапы становления и развития отечественного производства нефтяного кокса методом замедленного коксования. Автореф. дис. канд. техн наук. Уфа.: Ин-т, 2002.

2. Рудко В.А. Влияние вида сырья и параметров процесса замедленного коксования на технологию получения низкосернистых судовых топлив и нефтяного кокса различной структуры. Автореф. дис. канд. техн наук. Санкт-Петербург.: Ин-т, 2019.

3. Кретинин М.В. Механотехнологические аспекты производства нефтяного кокса, Уфа, Изд. ГУП ИНХП РБ, 2009 – С. 328

4. Шакирзина Г.И., Сладовская О.Ю., Сладовский А.Г., Зимнякова А.С., Нигметзинов Н.С. Замедленное коксование как эффективная технология углубления переработки нефти. Вестник технологического университета. Т. 20, № 14, 2017 г. С. 75-78

5. Шигапов Р.И., Нуриева Э.Н., Сигдеева Г.С. Оптимизация работы установок переработки тяжелых нефтяных остатков в процессах замедленного коксования//Бюллетень науки и практики. Т.10 №6. 2024. С. 446-453. doi.org/10.33619/2414-2948/103/47

6. Сайт Павлодарского нефтехимического завода: <http://pnhz.kz>

7. Сайт Атырауского нефтеперерабатывающего завода: <http://anpz.kz>

8. Технологический регламент установки замедленного коксования.

9. kmg.kz[электронный ресурс], АО НК «Казмунайгаз». Нефтяной кокс. Что это и как его получают. <https://www.kmg.kz/ru/press-center/articles/petroleum-coke>

10. Газета «Новатор», корпоративные СМИ. <http://anpz.kz>

11. Абызгильдин Ю.М., Кретинин М.В., Кузеев И.Р., и др. Реакторы установок замедленного коксования и их применение: Тематический обзор/ЦНИИТЭнефтехим – М.: 2008. - №67. 40 с.

12. Валявин Г.Г., Суюнов Р.Р., Валявин К.Г. и др. Современные и перспективные термолитические процессы глубокой переработки нефтяного сырья – Недра 2010 г.

УДК 66.096.5-932.2

Кислюк А.С., Сергеева А.М., Тарасов И.В., Сиротин И.С., Рохманенков А.С.

Подходы многомасштабного компьютерного моделирования газофазного реактора полимеризации альфа-олефинов

Кислюк Александр Сергеевич - студент 1 курса магистратуры факультета нефтегазохимии и полимерных материалов; confluc.xz@gmail.com

Сергеева Анна Михайловна - студентка 1 курса магистратуры факультета нефтегазохимии и полимерных материалов.

Тарасов Илья Витальевич - лавный специалист Центра цифровой трансформации; ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

Сиротин Игорь Сергеевич - декан факультета нефтегазохимии и полимерных материалов, доцент кафедры химической технологии пластических масс; ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

Рохманенков Александр Сергеевич - главный специалист Центра цифровой трансформации; ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

На этапах проектирования промышленных реакторов необходимо проводить предварительное моделирование поведения реакционной смеси. Создание различных моделей способствует правильному расчёту и даёт чёткое представление о происходящих внутри процессах. В данной работе обсуждается подход к моделированию газофазного реактора полимеризации в псевдооживленном слое. Предложенный метод rCFD-моделирования применяется для быстрого расчёта промышленных реакторов.

Ключевые слова: полимеризация альфа-олефинов, моделирование промышленных реакторов, псевдооживленный слой, газофазный реактор, газодинамическая модель, вычислительная гидродинамика.

Approaches to multiscale computer modeling of a gas-phase alpha-olefin polymerization reactor

Kislyuk A.S., Sergeeva A.M., Tarasov I.V., Sirotin I.S., Rokhmanenkov A.S.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia.

At the design stages of industrial reactors, it is necessary to conduct preliminary modeling of the behavior of the reaction mixture. The creation of various models contributes to the correct calculation and gives a clear idea of the processes taking place inside. In this paper, an approach to modeling a gas-phase polymerization reactor in a fluidized bed is discussed. The proposed rCFD modeling method is used for rapid calculation of industrial reactors.

Keywords: polymerization of alpha-olefins, modeling of industrial reactors, fluidized bed, gas-phase reactor, gas-dynamic model, computational fluid dynamics.

Одними из самых востребованных соединений в промышленности являются продукты полимеризации, ежегодно производится сотни миллионов тонн полимеров. Благодаря своим свойствам, они находят широкое применение в автомобилестроении, строительстве, медицине, нефтегазовой и пищевой промышленности и многих других областях. [1].

На данный момент известны следующие технологии получения полиолефинов [2]: полимеризация при высоком давлении (1200-3000 атм., 130-350°C, радикальный механизм); полимеризация в растворе (100 атм., 140-200°C, координационный механизм); суспензионная полимеризация (30-35 атм., 85-110°C, координационный механизм); газофазная полимеризация (20-35 атм., 80-110°C, координационный механизм). По сравнению с иными способами получения полиэтилена полимеризация этилена в газовой фазе (псевдооживленном слое) обладает многими преимуществами. Хороший отвод тепла, работа при пониженных температурах и давлениях, отсутствие необходимости в растворителях, делает этот процесс широко используемым в промышленности. При этом данный процесс является менее затратным как финансово, так и энергетически по сравнению с другими способами полимеризации. Однако данный способ получения полимеров имеет недостатки в виде сложностей масштабирования, возможности загрязнения стенок реактора, а также имеющихся ограничений производительности. Несмотря на обширный объём работ различных исследователей в данной области, вопросы, связанные с улучшением технологии

псевдооживления и исследованием взаимосвязанных процессов движения твердых частиц, сохраняют свою значимость и актуальность [3].

Процесс полимеризации в псевдооживленном слое часто применяют для производства разнообразных и широко используемых полимеров. Псевдооживленный (кипящий) слой возникает в двухфазных системах типа газ-твёрдое тело, газ-жидкость или жидкость-твёрдое тело, когда мелкие частицы переходят в текучее состояние путём пропуска через них газа или жидкости против направления действия силы тяжести. Благодаря небольшому размеру дисперсной твердой фазы псевдооживленный слой имеет низкое гидравлическое сопротивление и высокие значения удельной поверхности контакта фаз [4].

Впервые газофазный процесс получения полиэтилена (процесс UNIPOL) в псевдооживленном слое в промышленной установке был осуществлен компанией Union Carbide в 1986 году [2, 5]. Процесс UNIPOL был описан в нескольких патентах [6-9], а упрощенная технологическая схема показана на рисунке 1. Реактор с псевдооживленным слоем состоит из реакционной зоны и зоны уноса. Рецикловый газовый поток (непрореагировавший мономер) вместе с подпиточным газом (мономером) подается снизу колонны и псевдооживляет гранулированный слой. Гранулированный слой – катализатор и полимеризованные частицы. Для поддержания псевдооживленного слоя скорость газа через слой в 2-6 раз превышает минимальную скорость псевдооживления. Это необходимо, чтобы слой всегда содержал полимерные частицы, и для предотвращения образования локализованных "горячих точек". При непрерывной газофазной полимеризации отводят тепло из реактора путем охлаждения отведенных газов при рецикле и дальнейшем подмешивании их к подающейся смеси-реагента, в нем осуществляется хорошее перемешивание частиц и распределение температуры по всему объёму. Перспективы полимеризации в псевдооживленном слое связаны с возможностью оптимизации технологических параметров для повышения производительности (скорости подачи газа на входе в газо-фазный реактор, температуры входящего газа и его состава, давления в реакторе).

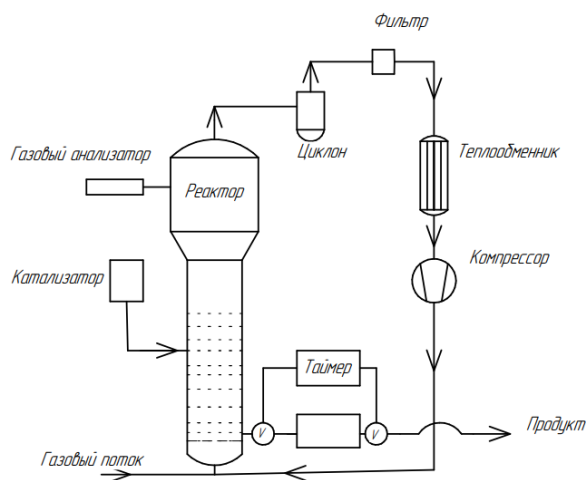


Рисунок 1 - Технологическая схема полимеризации альфа-олефинов в реакторе псевдооживленного слоя.

Полимеризация альфа-олефинов в реакторах с псевдооживленным слоем происходит по координационному механизму при низком давлении [10]. При ионно-координационной полимеризации молекула мономера поляризуется или занимает строго определенное положение, если она уже имеет диполь, при воздействии комплексных катализаторов. Для газофазной полимеризации используют двух- и трехкомпонентные комплексы галогенидов переходных металлов с алкилпроизводными алюминия (катализаторы Циглера—Натта); π -аллильные комплексы переходных металлов; оксидно-хромовые катализаторы. Рост полимерной цепи осуществляется путём внедрения молекулы мономера по связи переходный металл-углерод. В промышленности продукты полимеризации альфа-олефинов по такому механизму получают в газовой фазе. Процесс проводят при давлении 0,5-2,5 МПа при температуре 80-100°C. В таком случае образуется продукт, содержащий значительное число разветвленных звеньев в цепи, в промышленности выпускается полиэтилен с молекулярной массой 80000-500000.

Моделирование реактора — это определение количественной зависимости между производительностью реактора и условиями его эксплуатации.

Ключевые моменты каждого уровня моделирования для систем полимеризации этилена, можно обобщить следующим образом:

1. Молекулярные микромасштабные процессы включают в себя кинетику полимеризации, поверхностную адсорбцию. На ней происходит определение скорости полимеризации, или выхода полимера; определение молекулярной массы и ММР; химический состав полимерных цепей и его распределение; изучение микроструктуры полимерных цепей, включая разветвление цепи, наличие ненасыщенных групп и последовательность соединений.

2. Для мезомасштаба справедливы предположения о континууме. При мезомасштабном моделировании важны межфазный и внутрифазный тепло- и массоперенос, механика жидкости; разработка морфологии полимерных частиц; размер и распределение полимерных частиц.

3. На макроуровне соблюдается общий материальный и энергетический баланс. Рассматривается динамика управления реактором, изменение качества полимера. Контролируется распределение макроперемешивания и времени пребывания.

При изучении стадий реакции полимеризации выделяют основные элементарные реакции, включающие в себя: формирование активных центров, внедрение мономера в растущие полимерные цепи, реакции передачи цепи и деактивацию катализатора [2]. Одним из наиболее признанных механизмов роста цепи стал механизм, предложенный Косси [11, 12], вместе с его последующими модификациями.

Активация

- 1) $C_p \rightarrow P_0^*$ спонтанная активация;
- 2) $C_p + [A] \rightarrow P_0^*$ активация алкилом алюминия (А);
- 3) $C_p + [E] \rightarrow P_0^*$ активация донором электронов (Е);
- 4) $C_p + [H_2] \rightarrow P_0^*$ активация водородом (H_2);
- 5) $C_p + [M_1] \rightarrow P_0^* + [M_1]$ активация мономером 1 (M_1);
- 6) $C_p + [M_2] \rightarrow P_0^* + [M_2]$ активация мономером 2 (M_2).

Инициирование

Все цепные реакции начинаются со стадии инициирования, в ней образуются первые свободные радикалы. В данных стадиях принято использовать каталитически действующие нестойкие вещества, которые позволяют легко получить свободные радикалы. Данная стадия включает в себя:

- 7) $P_0^* + [M_1] \rightarrow P_{1,0,1}^*$ инициирование M_1 нормальным активным центром;
- 8) $P_0^* + [M_2] \rightarrow P_{0,1,2}^*$ инициирование M_2 нормальным активным центром;
- 9) $P_{H,0}^* + [M_1] \rightarrow P_{1,0,1}^*$ инициирование M_1 активным центром с Н;
- 10) $P_{H,0}^* + [M_2] \rightarrow P_{0,1,2}^*$ инициирование M_2 активным центром с Н;
- 11) $P_{A,0}^* + [M_1] \rightarrow P_{1,0,1}^*$ инициирование M_1 активным центром с А;
- 12) $P_{A,0}^* + [M_2] \rightarrow P_{0,1,2}^*$ инициирование M_2 активным центром с А;
- 13) $P_{E,0}^* + [M_1] \rightarrow P_{1,0,1}^*$ инициирование M_1 активным центром с Е;
- 14) $P_{E,0}^* + [M_2] \rightarrow P_{0,1,2}^*$ инициирование M_2 активным центром с Е.

Рост цепи

На этой стадии происходит последовательное присоединение к макромолекуле звеньев с образованием новых радикалов.

- 15) $P_{m,n,1}^* + [M_1] \rightarrow P_{m+1,n,1}^*$ рост цепи типа 1 с M_1 ;
- 16) $P_{m,n,1}^* + [M_2] \rightarrow P_{m,n+1,1}^*$ рост цепи типа 1 с M_2 ;
- 17) $P_{m,n,2}^* + [M_1] \rightarrow P_{m+1,n,2}^*$ рост цепи типа 2 с M_1 ;
- 18) $P_{m,n,2}^* + [M_2] \rightarrow P_{m,n+1,2}^*$ рост цепи типа 2 с M_2 ;

Передача цепи

- 19) $P_{m,n,i}^* \rightarrow P_0^* + q'_{m,n}$ спонтанная передача цепи;
- 20) $P_{m,n,i}^* + [H_2] \rightarrow P_{H,0}^* + q'_{m,n}$ передача цепи на водород;
- 21) $P_{m,n,i}^* + [A] \rightarrow P_{A,0}^* + q'_{m,n}$ передача цепи на алкил алюминия;
- 22) $P_{m,n,i}^* + [E] \rightarrow P_{E,0}^* + q'_{m,n}$ передача цепи на донора электронов;
- 23) $P_{m,n,i}^* + [M_1] \rightarrow P_{1,0,1}^* + q'_{m,n}$ передача цепи на мономер 1;
- 24) $P_{m,n,i}^* + [M_2] \rightarrow P_{0,1,2}^* + q'_{m,n}$ передача цепи на мономер 2.

Обрыв цепи

В ходе данной стадии происходит взаимодействие радикальных частиц с образованием неактивных макромолекул, после чего реакция прекращается.

25) $P_{m,n,i}^* \rightarrow C_d + q_{m,n}$ спонтанная дезактивация;

26) $P_{m,n,i}^* + [Z] \rightarrow C_d + q_{m,n}$ дезактивация примесями;

27) $P_{m,n,i}^* + [A] \rightarrow C_d + q_{m,n}$ дезактивация алкилом алюминия;

28) $P_{m,n,i}^* + [E] \rightarrow C_d + q_{m,n}$ дезактивация донором электронов;

29) $P_{m,n,i}^* + [H_2] \rightarrow C_d + q_{m,n}$ дезактивация водородом;

30) $P_{m,n,i}^* + [M_j] \rightarrow C_d + q_{m,n}$ дезактивация мономерами;

где C_p - потенциальный активный центр катализатора; P_0^* - активный центр без полимерной цепи; $P_{m,n,i}^*$ - активный центр с m звеньями мономера 1 и n звеньями мономера 2, при этом третий индекс i обозначает тип концевой мономера цепи, связанного с активным центром; $q'_{m,n}$ - мертвая полимерная цепь с концевой двойной связью; и $q_{m,n}$ - мертвая полимерная цепь без концевой двойной связи.

Основным ограничением скорости реакции в реакторе с псевдооживленным слоем является скорость теплоотвода [13]. Численное моделирование помогает решить данное ограничение, при этом появляется возможность для оценки влияния размера частиц катализатора и скорости подачи мономера на параметры проведения процесса в реакторе кипящего слоя.

Цель разработки технологического процесса и проведения исследований с применением моделирования заключается в получении высококачественного полимера с высокой производительностью. Необходимо понимать взаимосвязь между эксплуатационными свойствами полимера, его характеристиками и условиями работы реактора. Физико-механические свойства полиэтилена определяются такими параметрами, как плотность, кристалличность, химический состав, молекулярная масса и её распределение. Главной задачей моделирования является описание движения частиц с учётом их роста. Исследовав сложную систему газ-твёрдые частицы и изучив их смешивание, можно будет не только оценить эффективность реактора, но и иметь возможность определять оптимальные параметры для проведения процесса полимеризации.

Целью данной работы является обзор методов моделирования процесса газовой полимеризации, изучение процесса моделирования, а также создание простейшей модели псевдооживленного слоя в ANSYS FLUENT.

При моделировании псевдооживленного слоя существуют различные способы для описания взаимодействия газа и частиц, их гидродинамики (с дальнейшим учётом самой реакции полимеризации). Псевдооживленный слой принято рассматривать в виде двухфазной системы, состоящей из двух компонентов: дискретная (разреженная) фаза — газовые пузыри; непрерывная (плотная) фаза - газ, фильтрующийся между взвешенными твердыми частицами. Считают, что весь избыток газа сверх соответствующего скорости проходит через слой в виде пузырей. Эти пузыри приводят в движение частицы катализатора. Такое допущение позволяет математически описать процесс со следующими основными представлениями [14, 15]:

- поведение газа в окрестностях пузыря описывается моделью Дэвидсона, которая объясняет разницу между медленно и быстро поднимающимися пузырями;
- скорость пузырьков зависит от скорости потока и относительной скорости пузырьков по отношению к плотной фазе;
- газовый пузырь не содержит твердых частиц и имеет сферическую форму;
- в плотной фазе газ течет как несжимаемая, вязкая жидкость;
- давление внутри пузыря постоянно.

Помимо изучения поведения кипящего слоя с точки зрения пузыря, существуют многофазные физико-математические модели Эйлера, которые используются для описания псевдооживленного слоя, основанные на уравнении Навье-Стокса и законе трения Гидасова. Численная модель газотвердых потоков может описываться сочетанием вычислительной гидродинамики с методом дискретных элементов [16, 17]. В методе дискретных элементов определяется траектория каждой частицы и столкновение их друг с другом.

Поскольку общее число частиц, участвующих в общем потоке чрезвычайно велико, решение уравнения для каждой частицы отдельно непрактично. Поэтому для исследования потоков твердых частиц в промышленных установках используют усреднённые уравнения движения. В литературе приводятся примеры использования модели рекуррентной вычислительной гидродинамики [18]. Для быстрого расчёта необходимо создать базу данных рекуррентности, которая будет отслеживать

динамику газа и твердых частиц на каждом повторяющемся временном шаге. Предполагается, что, объединив размеры твердых частиц по группам и изучив их рост в ходе реакции полимеризации, можно будет считать, что их рост и параметры процесса можно экстраполировать по всей длине колонны. На каждом повторяющемся временном шаге химическая кинетика и теплота реакции определяются локально на основе концентрации и температуры компонентов.

Основная сложность при проектировании реакторов – точный расчёт, который требует значительных вычислительных затрат. Применяемый метод рекуррентной вычислительной гидродинамики предоставляет возможность масштабировать промышленные реактора [19]. Однако, при своих достоинствах, данный метод подразумевает необходимость создания отдельной базы данных для группы частиц определенных размеров, а также необходимость использования вспомогательных методов [20]. При решении двухжидкостной модели требуется набор моделей, как физических, так и эмпирических, чтобы замкнуть систему уравнений. Одним из важных и сложных замыканий является напряжение в эмульсионной фазе. В настоящее время используются два подхода к определению напряжений в эмульсионной фазе. В первом случае - модель постоянной вязкости, в ней давление твердой фазы определялось только как функция локальной пористости твердого тела с использованием эмпирических корреляций и динамической сдвиговой вязкости. Второй подход использует кинетическую теорию гранулированного потока, аналогичную кинетической теории газов. Макроскопическое поведение твердой фазы описывается уравнениями, которые учитывают энергию, связанную с частицами, возникающую в результате столкновений и флуктуирующих движений частиц. Решение этого уравнения используется для описания переноса импульса внутри твердой фазы. Для расчета коэффициента обмена импульсом между жидкостью и твердым телом в ANSYS FLUENT могут использоваться корреляции Syamlal–O’Brien и Gidaspow для использования в гранулированном потоке, в то время как корреляция Wen и Yu может быть использована, если среда разбавлена.

В ходе предварительного этапа моделирования была построена двухжидкостная модель псевдооживленного слоя в 2D постановке с частицами постоянного размера ($2,8 \cdot 10^{-4}$ м). Скорость подачи газа – 0,31 м/с, плотность газа – 1.225 кг/м³, объёмная доля газа – 0,4 (условие минимальной скорости псевдооживления). Плотность частиц – 2400 кг/м³, коэффициент сопротивления для частиц – 0,9, высота слоя частиц – 0,24 м. Также были заданы граничные условия (рисунок 2). Данная модель позволяет изучить поведение псевдооживленного слоя.

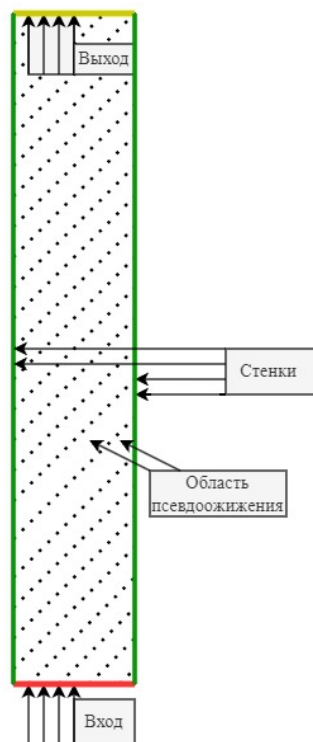


Рисунок 2 - Граничные условия для моделирования псевдооживленного слоя (размеры реактора 0,2 м x 1 м).

На рисунке 3 показано поведение псевдоожиженного слоя с описанными ранее характеристиками. Псевдоожиженный слой имеет достаточно сложную структуру, в нём наблюдаются неоднородности как по концентрации элементов, так и по их скорости. Рост частиц твердой фазы осуществляется не равномерно, поэтому моделирование подобных задач необходимо, чтобы впоследствии предложить технические решения, которые помогут оптимизировать работу промышленных реакторов, позволяя получать частицы нужной фракции.

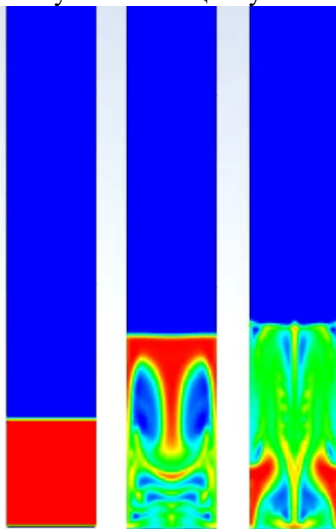


Рисунок 3 - Поведение псевдоожиженного слоя

Модель реактора газовой фазы полимеризации дает представление, как реализуется псевдоожижение частиц и теплоотвод в реакторе, что необходимо контролировать для снижения вероятности спекания и агломерации частиц полимера; а также достичь нужного распределения частиц по размерам при различных рабочих условиях. Создание комплексных математических моделей и дальнейший подбор параметров процесса, позволяет повысить скорость массообмена, улучшить надежность реакторов и увеличить эффективность работы. В дальнейшем планируется построение многомасштабных компьютерных моделей процесса полимеризации в псевдоожиженном слое, разработка технологической и принципиальной схем процесса полимеризации альфа-олефинов, создание прототипа реактора, близкого к реальному, а также подготовка пакета документов для разработки исходных данных для проектирования.

Список литературы

1. Малкин А. Я. Реология полимеров в нефтяной промышленности //Высокомолекулярные соединения. Серия С. – 2021. – Т. 63. – №. 2. – С. 130-148.
2. Xie T. et al. Gas phase ethylene polymerization: Production processes, polymer properties, and reactor modeling //Industrial & Engineering Chemistry Research. – 1994. – Т. 33. – №. 3. – С. 449-479
3. Митрофанов А. В. Расчетно-экспериментальное исследование гидромеханических и тепловых процессов в псевдоожиженном слое : дис. – Ивановский государственный химико-технологический университет, 2011.
4. Худойбердиева Н. Ш. и др. Особенности гидродинамики полидисперсных зернистых материалов псевдоожиженных слоев //Universum: технические науки. – 2024. – Т. 8. – №. 4 (121). – С. 22-28.
5. Abbasi M. R., Shamiri A., Hussain M. A. Dynamic modeling and Molecular Weight Distribution of ethylene copolymerization in an industrial gas-phase Fluidized-Bed Reactor //Advanced Powder Technology. – 2016. – Т. 27. – №. 4. – С. 1526-1538.
6. Патент США № 4003712, 18.01.1977.
7. Патент США № 4011382, 08.03.1977.
8. Патент США № 4303771, 01.12.1981.
9. Патент США № 4349648, 14.09.1982.
10. Коршак В. В. (ред.). Технология пластических масс: Учебное пособие. – Химия, 1985.
11. Cossee P. Ziegler-Natta catalysis I. Mechanism of polymerization of α -olefins with Ziegler-Natta catalysts //Journal of Catalysis. – 1964. – Т. 3. – №. 1. – С. 80-88.

12. Arlman E. J., Cossee P. Ziegler-Natta catalysis III. Stereospecific polymerization of propene with the catalyst system $\text{TiCl}_3\text{-AlEt}_3$ //Journal of Catalysis. – 1964. – Т. 3. – №. 1. – С. 99-104.
13. Патент РФ №2000101823/04, 04.06.1998.
14. Патент РФ №2008140663/04, 14.10.2008.
15. Патент США №0089691, 28.09.83.
16. Самсонов И.А. Моделирование процесса регенерации катализатора в технологии каталитического крекинга. – 2023.
17. Khan M. J. H. et al. CFD simulation of fluidized bed reactors for polyolefin production—A review //Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2014. – Т. 20. – №. 6. – С. 3919-3946.
18. Каграманов Ю. А. и др. Моделирование пузырькового кипящего слоя методом сплошных сред и методом дискретных фаз //ББК 31л0 И73. – 2016. – С. 89.
19. Schneiderbauer S., Aigner A., Pirker S. A comprehensive frictional-kinetic model for gas–particle flows: Analysis of fluidized and moving bed regimes //Chemical Engineering Science. – 2012. – Т. 80. – С. 279-292.
20. Dabbagh F., Pirker S., Schneiderbauer S. A fast modeling of chemical reactions in industrial-scale olefin polymerization fluidized beds using recurrence CFD //AIChE Journal. – 2021. – Т. 67. – №. 5. – С. e17161.

УДК 519.6:004.942

Кольцова Э.М., Бабкин М.А., Попова Н.А., Женса А.В.

Фундаментальные основы для моделирования процессов измельчения

Кольцова Элеонора Моисеевна – д.т.н., заведующий кафедрой информационных компьютерных технологий (ИКТ); koltsova.e.m@muctr.ru

Бабкин Михаил Андреевич – ассистент кафедры ИКТ;

Попова Нелля Александровна – доцент кафедры химической технологии керамики и огнеупоров;

Женса Андрей Вячеславович – к.т.н., доцент кафедры ИКТ.

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

Рассмотрены термодинамические потоки и движущие силы процесса дробления и применен принцип минимума производства энтропии, получена зависимость для определения размера частиц, устойчивых к дроблению, проверенная на экспериментальных результатах по измельчению корунда в планетарной мельнице. Для моделирования кинетики измельчения получено интегро-дифференциальное уравнение баланса числа частиц, где вероятность дробления частиц определена из физико-химической сущности термодинамических потоков дробления. Приведены результаты расчета плотности функции распределения числа частиц и изменения среднего размера частиц корунда при измельчении во времени, хорошо совпадающие с экспериментальными данными. Найдены оптимальные режимы проведения процесса измельчения корунда в планетарной мельнице для получения частиц заданного размера.

Ключевые слова: дробление частиц, математическое моделирование, плотность распределения по размерам, разностная схема, размер частиц устойчивых к дроблению.

Fundamental principles of studying grinding processes

Koltsova E.M., Babkin M.A., Popova N.A., Zhensa A.V.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

Thermodynamic flows and driving forces of the crushing process are considered and the principle of minimum entropy production is applied, a dependence for determining the size of particles resistant to crushing is obtained, verified on the experimental results of corundum grinding in a planetary mill. To simulate the kinetics of grinding, an integro-differential equation of the balance of the number of particles is obtained, where the probability of particle crushing is determined from the physicochemical essence of the thermodynamic crushing flows. The results of calculating the density of the distribution function of the number of particles and the change in the average size of corundum particles during grinding over time are presented, which coincide well with the experimental data. Optimum modes of the corundum grinding process in a planetary mill are found to obtain particles of a given size.

Key words: particle crushing, mathematical modeling, size-distribution density, difference scheme, crushing resistant particle size.

Введение

При измельчении происходит разрушение частиц за счет достижения критических напряжений, вызванных воздействием на частицу внешних сил. Такими воздействиями могут быть температурные воздействия, ультразвуковые или механические. В работе будет рассматриваться процесс измельчения корунда в планетарной мельнице.

Для исследования кинетики измельчения в мировой практике рассматривают балансовые уравнения в виде интегро-дифференциальных уравнений для плотности распределения частиц по объемам (размерам) [1-10], где в левой части находится производная от плотности распределения частиц во времени, а в правой части слагаемые, ответственные за приход и уход частиц при их измельчении. Эти работы отличаются тем, что различными зависимостями описываются соотношения для вероятности дробления частиц «А», и для условной вероятности «В» (которая характеризует, что при дроблении частицы возникает частица, попадающая в группу размеров, для которой в данный момент рассчитывается плотность распределения). По результатам сопоставления экспериментальных и расчетных данных находились неизвестные параметры функций А и В. В работах [11-12] была получена взаимосвязь вероятности дробления частицы «А» с критерием дробления частицы We в виде:

$$A(l) = LWe, \quad (1)$$

В данной работе ставилась задача проверки соотношения (1). Для этой цели записывалось уравнение баланса числа частиц по размерам с учетом дробления частиц, проводились экспериментальные исследования по кинетике измельчения частиц корунда в планетарной мельнице. Также в данной работе ставилась задача получения зависимости для диаметра, устойчивого к дроблению, для нахождения предельного размера частицы при измельчении при приложенных усилиях и заданных режимах (на основании принципов минимума производства энтропии).

Экспериментальная часть

Процесс дробления оксида алюминия (с средним начальным размером $d \sim 25$ мкм) происходил в планетарной мельнице (при скорости вращения барабанов 200 об/мин) в среде этанола, влияющим на уменьшение поверхностной энергии частиц. В барабаны планетарной мельницы загружались мелющие шары, состоящие из диоксида циркония, размер которых, в зависимости от эксперимента, был равен либо 2 мм, либо 5 мм. После помещения в барабан мелющих тел определенной массы, засыпался порошок Al_2O_3 . Масса порошка Al_2O_3 рассматривалась на основе массы мелющих тел.

Для каждого эксперимента из серии, измерялось распределение частиц по размерам и средний размер частиц. При достижении времени измельчения в 90 минут средний размер частиц не менялся.

Процесс измельчения вели до тех пор, пока средний размер частиц не становился постоянным во времени.

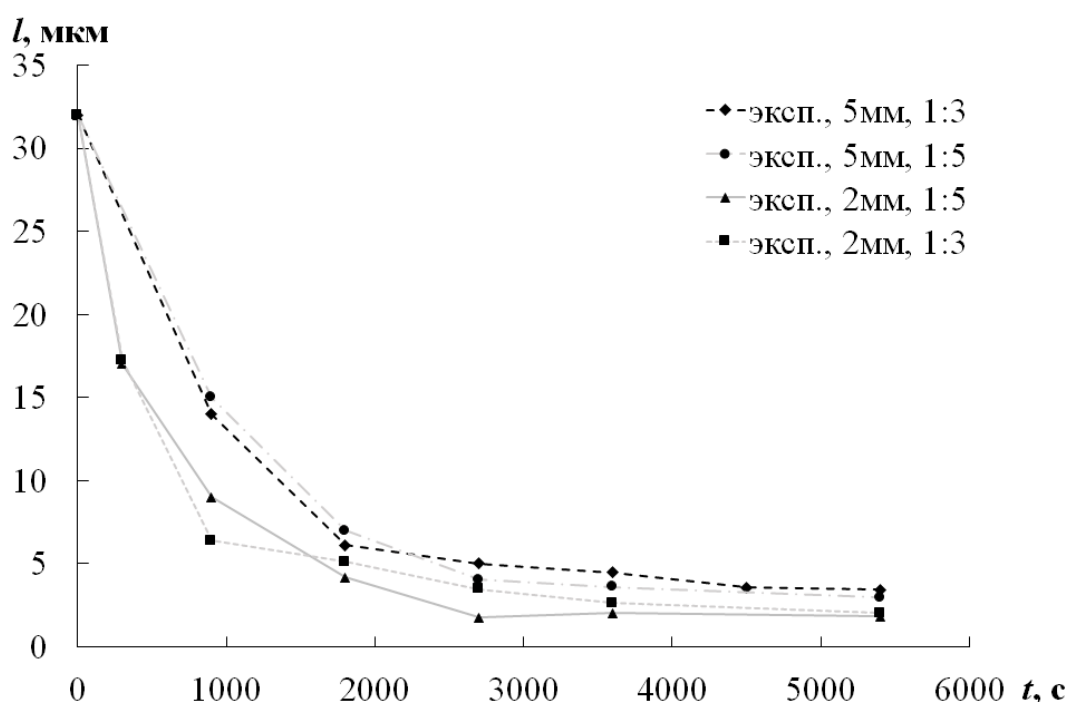


Рисунок 1 - Экспериментальная зависимость среднего размера частиц от времени для различных условий проведения эксперимента

На рис. 1 представлены кривые изменения среднего размера частиц оксида алюминия от времени для различных условий проведения процесса измельчения. Видно, что при времени измельчения 90 минут средний размер частиц не меняется, и система выходит на стационарное состояние.

Теоретическая часть

В [11-13] на основе аппарата механики гетерогенных сред были получены уравнения сохранения массы, импульса и энергии с учетом дробления частиц для сплошной и гетерогенной полидисперсной среды.

В [11, 12] на основе применения методов термодинамики необратимых процессов были получены движущие силы и термодинамические потоки дробления в виде:

$$X_{др,ч} = \frac{-\pi d^2(2\Sigma_1 - \Sigma_{12})}{2} + \frac{\pi \rho_2^0 d^3 v^2}{12}, \quad (4)$$

$$J_{др} = \rho_2^0 r A(r) f(r) dr, \quad (5)$$

где $f(r)dr$ – число частиц, принадлежащих интервалу $[r, r + dr]$.

В турбулентном режиме смешения скорость движения можно представить в виде [14]:

$$v^2 = (\varepsilon d)^{2/3},$$

тогда движущая сила дробления преобразуется к виду

$$X_{dp,ч} = \frac{-\pi d^2(2\Sigma_{r1} - \Sigma_{rr})}{2} + \frac{\pi \rho_2^0 d^3 (d\varepsilon)^{\frac{2}{3}}}{12}, \quad (6)$$

Процесс дробления идет до тех пор, пока размер включений не становится постоянным. То есть рассматриваемая система будет находиться в стационарном состоянии. Тогда согласно принципу минимума производства энтропии для стационарного состояния [15, 16] производство энтропии минимально ($\min \sigma$).

Производство энтропии (2) рассчитывается как произведение движущей силы на поток дробления.

$$\sigma = J_{др} X_{др}, \quad (7)$$

где $J_{др}$ – термодинамический поток дробления.

Из соотношения Онзагера следует, что поток связан с движущей силой как произведение феноменологического коэффициента на движущую силу [15, 16]. Минимум функции производства энтропии можно найти, взяв производную по размеру и приравняв её к нулю, тогда условие экстремума будет иметь вид:

$$J_{др} \frac{dX_{др}}{dd} = 0, \quad (8)$$

Критерий Вебера для частиц имеет вид:

$$We = \frac{\rho d v^2}{2\Sigma_1 - \Sigma_{12}}$$

или

$$We = \frac{\rho d^{\frac{5}{3}} \varepsilon^{\frac{2}{3}}}{2\Sigma_1 - \Sigma_{12}}, \quad (9)$$

Из соотношения (9) получена зависимость:

$$d = \frac{[6(2\Sigma_1 - \Sigma_{12})]^{\frac{3}{5}}}{\rho_2^{\frac{3}{5}} \varepsilon^{\frac{2}{5}}}, \quad (10)$$

Предельный размер частиц пропорционален поверхностной энергии в степени 3/5, обратно пропорционален удельной мощности на перемешивание в степени 2/5 и плотности включений в степени 3/5.

Соотношение (10) использовали для поиска оптимальных условий процесса измельчения при приведении экспериментальных исследований достижения размера частицы не более 1,5 мкм.

Для рассмотрения кинетики процесса дробления частиц запишем уравнение изменения плотности распределения числа частиц по объемам:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -f(r)A(r) + \int_r^{r_{max}} f(\gamma)A(\gamma)B(r/\gamma)d\gamma, \quad (11)$$

Распределение (B) дочерних частиц было взято из статьи [17]. С дополнением нормировки, которое осуществлялось посредством приведения дочернего и родительского размера к единичным представлениям. Форма распределения дочерних частиц в случае, если родительская частица имеет единичный размер, а дочерняя лежит в пределах от 0 до 1 имеет следующий вид:

$$B(r, \gamma) = 30P \left(\frac{r}{\gamma} \right)^2 \left(1 - \frac{r}{\gamma} \right)^2, \quad (12)$$

Учитывая выражение (1) для термодинамического потока и соотношение Онзагера, связывающего линейно термодинамический поток с термодинамической движущей силой, определим вероятность дробления частиц $A(r)$.

Для решения уравнения (11) была разработана разностная схема, состоящая из двух подсхем.

Первая подсхема:

$$\frac{f_j^{n+\frac{1}{2}} - f_j^n}{\Delta t} = \sum_{k=j}^{Nr} f_k^n A_k^n B_{jk}^n \Delta l, \quad (13)$$

Вторая подсхема:

$$\frac{f_j^{n+1} - f_j^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = -f_j^{n+1} A_j^n, \quad (14)$$

где из подсхемы (13) определяется $f_j^{n+1/2}$ по следующему соотношению:

$$f_j^{n+\frac{1}{2}} = f_j^n + \Delta t \sum_{k=j}^{Nr} f_k^n A_k^n B_{jk}^n \Delta l, \quad (15)$$

Найденные значения $f_j^{n+1/2}$ (15) подставляются во вторую подсхему (14) и определяется значение f_j^{n+1} :

$$f_j^{n+1} = \frac{f_j^{n+\frac{1}{2}}}{1 + \Delta t A_j^n}, \quad (16)$$

где n – n -ый шаг по времени, $n+1/2$ – дробный шаг по времени, $n+1$ – $n+1$ -ый шаг по времени, Δt – интервал времени, индекс j относится к размеру частиц.

Обсуждение и результаты

Для определения размера частиц устойчивых к дроблению пользовались соотношением (10). Где неизвестным является мощность на дробление частиц. В произведённых экспериментах по измельчению корунда варьировали соотношением массы мелющих шаров к массе дробящегося материала. $z_1 = m_{ball}/m_p$, а также размером мелющих шаров.

Вторым параметром был $z_2 = d_0/d_{ball}$, где $d_0 = 1 \text{ мм}$. Мощность, затрачиваемую на дробление частиц представили в виде регрессионной зависимости:

$$\varepsilon = a_0 + a_1 z_1 + a_2 z_2 + a_{12} z_1 z_2, \quad (17)$$

Коэффициенты регрессии a_0 , a_1 , a_2 и a_{12} подбирались методом наименьших квадратов сравнивая экспериментально полученный устойчивый к измельчению размер и размер определяемый соотношением (10).

В качестве значения d_{exp} брали размер частиц, когда при данных условиях (соотношение мелющих шаров к порошку материала, выбранного размера шара) размер частицы уже не менялся во времени, т.е. был предельным, что соответствовало времени дробления около 90 минут. По имеющимся экспериментальным значениям для уравнения изменения баланса числа частиц были подобраны коэффициенты L и P входящие в функции $A(r)$ и $B(r, \gamma)$ соответственно. Подбор значений осуществлялся алгоритмом градиентного спуска. В результате подбора были получены значения:

$$L = 610,32 \quad P = 0,013, \quad (18)$$

На рис. 2 представлены результаты расчета среднего значения диаметра частиц корунда. Расчет производился на основе уравнения баланса числа частиц (11) с использованием разностных схем (13)-(14) и соотношения (1) для вероятности разрушения частицы (отражающего физико-химическую сущность явлений, протекающих в процессе измельчения).

В таблице 1 представлен результат сравнения экспериментальных и расчётных данных по значению диаметра частиц, устойчивых к дроблению.

Размер, мкм

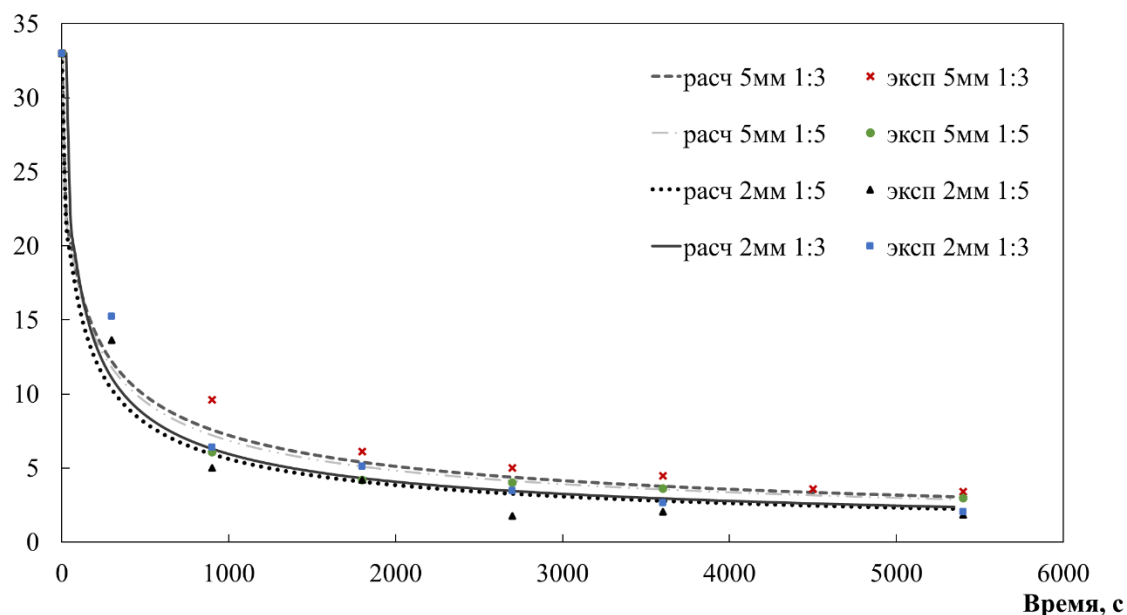


Рисунок 2 - Результаты расчета по получению среднего размера частицы по времени в процессе измельчения

Хорошо просматривается зависимость того, что чем меньше диаметр мелющего шара и чем сильнее превосходит общая масса шаров массу дробящегося материала, тем интенсивнее идёт дробление и, следовательно, размер частиц меньше.

Таблица 1

Сравнение результатов расчётных и экспериментальных данных

Размер мелющего шара, мм	Соотношение масс мелющих шаров к порошку	Размер частиц по соотношению, мкм	Размер частиц в результате эксперимента, мкм	Относительная ошибка, %
5	3:1	3,07	3,424	10,25
5	5:1	2,87	2,972	3,29
2	3:1	2,38	2,043	16,52
2	5:1	2,25	1,831	22,97

Таким образом выбирая для планетарной мельницы определённый режим, можно получать частицы заданных размеров, используя соотношения (10), (17).

Заключение

В данной работе отражается, что проведены экспериментальные исследования по измельчению корунда в планетарной мельнице с целью, чтобы полученные экспериментальные результаты использовались для верификации математической модели.

На основе методов механики гетерогенных сред и термодинамики необратимых процессов (с использованием вариационного принципа минимума производства энтропии) получена зависимость для определения диаметра частицы, устойчивой к дроблению. Мощность на дробление частиц, входящая в данную зависимость, была представлена в виде регрессии от факторов, влияющих на процесс дробления (соотношение мелющих тел к измельчаемому материалу, размер мелющих шаров). Расчетные и экспериментальные значения размеров частиц, устойчивых к дроблению, хорошо согласуются.

Получено уравнение для плотности распределения частиц по линейным размерам с учетом явлений дробления (что позволило сократить расчетное время для решения этого уравнения).

Разработана разностная схема для решения уравнения плотности распределения частиц по размерам с учетом явлений дробления.

Получена зависимость для вероятности дробления частиц в уравнении баланса числа частиц, отражающая физико-химическую сущность явлений, протекаемых при дроблении (нелинейное влияние размера измельчаемой частицы, влияние режимных параметров планетарной мельницы).

Проведены расчеты по кинетике процесса измельчения корунда. Результаты изменений среднего размера частицы во времени хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Работа выполнена в рамках программы развития РХТУ им. Д.И Менделеева «Приоритет-2030».

Обозначения

A – вероятность разрушения частицы;

a_1, a_2, a_{12}, a_0 – коэффициенты регрессионной зависимости для мощности на перемешивании

B – вероятность получения частицы за счёт разрушения другой;

D – диаметр измельчаемой частицы

Dt – корректирующий параметр интегрирования

L – феноменологический коэффициент;

l – размер частицы, мкм;

t – время, с;

r – размер частицы, (объём);

V – предельное значение скорости удара;

V_0 – предельное значение скорости удара;

We – критерий Вебера;

z_1 – величина, характеризующая во сколько раз масса шаров превосходит массу измельчаемого материала;

z_2 – отнесённый к характеристическому размеру диаметр мелющего тела;

$f(r)$ – распределение частиц по размерам (объемам);

γ – размер, характеризующий родительскую частицу

σ – поверхностная энергия взаимодействия;

ρ – истинная плотность дисперсной фазы;

Σ_1 – поверхностная энергия частицы;

Σ_2 – поверхностная энергия мелющих шаров;

Σ_{12} – поверхностная энергия при взаимодействии частиц при разрушении.

Список литературы

1. Müller L., Klar A., Schneider F. A numerical comparison of the method of moments for the population balance equation // *Mathematics and Computers in Simulation*. 2019. V. 165. P. 26.
2. Rosales-Marín G., Andrade J., Alvarado G., Delgadillo J.A., Tuzcu E.T. Study of lifter wear and breakage rates for different lifter geometries in tumbling mill: Experimental and simulation analysis using population balance model // *Minerals Engineering*. 2019. V. 141. P. 110.
3. Bhattacharyya A., Tuzcu E.T., Rajamani R. Experimental study on non linear behavior of breakage rates due to fines generation in wet batch milling // *Miner. Eng.* 2016. V. 99. P. 19.
4. Liné A., Frances Ch. Discussion on DQMOM to solve a bivariate population balance equation applied to a grinding process // *Powder Technology*. 2016. V. 295. P. 234.
5. Frances C., Liné A. Comminution process modeling based on the monovariate and bivariate direct quadrature method of moments // *AIChE*. 2014. V. 60. P. 1621.
6. Bazin Cl. Data reconciliation for the calibration of a model for batch grinding // *Minerals Engineering*. 2005. V. 18. P. 1052.
7. Pieper M., Kutelova Z., Aman S., Tomas J. Modeling of baryte batch grinding in a vibratory disc mill // *Advanced Powder Technology*. 2013. V. 24. P. 229.
8. Hasan M., Palaniandy S., Hilden M., Powell M. Simulating product size distribution of an industrial scale VertiMill® using a time-based population balance model // *Minerals Engineering*. 2018. V. 127. P. 312.
9. Xiaoli W., Weihua G., Chunhua Y., Yalin W. Wet grindability of an industrial ore and its breakage parameters estimation using population balances // *International Journal of Mineral Processing*. 2011. V. 98. P. 113.
10. Xiaoli W., Yalin W., Chunhua Y., Degang X., Weihua G. Hybrid modeling of an industrial grinding-classification process // *Powder Technology*. 2015. V. 279. P. 75.

11. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Кольцова Э.М. Системный анализ процессов химической технологии. Энтропия и вариационные методы неравновесной термодинамики в задачах химической технологии. М.: Наука, 1988.
12. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Кольцова Э.М. Системный анализ процессов химической технологии: методы неравновесной термодинамики: монография / Под ред. Жаворонков Н. М. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2021.
13. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Кольцова Э.М. Системный анализ процессов химической технологии: массовая кристаллизация: монография / ответственный редактор Н.М. Жаворонков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт. 2023.
14. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика / Издание 3-е, исправленное. Москва: ИКИ. 2016.
15. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: Прогресс, 2014.
16. Кольцова Э.М., Гордеев Л.С. Синергетика в химии и химической технологии. М.: Юрайт, 2023.
17. Laakkonen M., Alopaeus V., Aittamaa J. Validation of bubble breakage, coalescence and mass transfer models for gas-liquid dispersion in agitated vessel // Chemical Engineering Science. 2006. V. 61. № 1. P. 218.

УДК 66.063.94

Кротова М.В., Поворов А.А., Липин А.Г., Липин А.А.

Извлечение соляной кислоты из отработанного травильного раствора

Кротова Мария Витальевна - главный технолог;

Поворов Александр Александрович – генеральный директор;

ООО «Баромембранная технология», Россия, Владимир, 600033, ул. Элеваторная, 6.

Липин Александр Геннадьевич – д.т.н., профессор кафедры;

Липин Андрей Александрович – д.т.н., заведующий кафедрой;

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», Россия,

Иваново, 153000, пр. Шереметевский, 7.

Рассмотрен процесс регенерации отработанного травильного раствора (ОТР), содержащего кроме непрореагировавшей соляной кислоты хлористое железо. В раствор вводится серная кислота. В результате образуется сульфат железа и соляная кислота. Затем соляная кислота извлекается из раствора путем дистилляции. Показано влияние технологических параметров на процесс дистилляции ОТР.

Ключевые слова: соляная кислота, травильный раствор, регенерация, дистилляция.

Regeneration hydrochloric acid of spent pickling solution

Krotova M.V.¹, Aleksandr A. Povorov A.A.¹, Aleksandr G. Lipin A.G.², Lipin A.A.²

¹ LLC "Baromembrane technology", Vladimir, Russian Federation

² Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Ivanovo, Russian Federation

The process of regeneration of spent pickling solution (SPS) containing, in addition to unreacted hydrochloric acid, iron chloride is considered. Sulfuric acid is introduced into the solution. As a result, ferrous sulfate and hydrochloric acid are formed. The hydrochloric acid is then extracted from the solution by distillation. The influence of technological parameters on the distillation process of SPS is shown.

Key words: hydrochloric acid, pickling solution, regeneration, distillation.

Травление — необходимая операция, предшествующая нанесению поверхностных покрытий на металл различными способами. К ним относятся: гальванопокрытие, горячее оцинкование, нанесение конверсионных пленок (например, фосфатных) до последующей обработки (вытяжка, волочение и прессование), а также как окончательная или межоперационная обработка при прокатке листов, лент, проволоки, стержней и труб. В последнем случае речь идет главным образом об удалении окалина, т.е. устранении оксидов металлов, возникших на поверхности материала в ходе термической обработки. Кислоту для травления выбирают в зависимости от обрабатываемого материала. Для углеродистой стали чаще используют соляную, реже – серную кислоту.

Известно, что при травлении не удастся использовать весь объем раствора в травильной ванне, в итоге в растворе помимо соли кислоты с металлом травленого материала остается существенное количество свободной кислоты (от четверти до трети первоначально введенного объема).

В случае слива отработанного травильного раствора (ОТР) свободная кислота для последующего процесса травления не используется. Помимо этого, при нейтрализации отработанного раствора известковым молоком (или же раствором гидроокиси натрия) окружающая среда загрязняется растворенными в воде кальциевыми или натриевыми солями.

Целью регенерации кислот и использованных травильных растворов является возврат в процесс травления максимально возможного количества первоначально введенной кислоты. Регенерированная кислота не оказывает отрицательного влияния на эффективность очистки металла по сравнению с исходной кислотой. Она протравливает так же эффективно, как чистая кислота. Существует несколько технологий регенерации соляной кислоты. Это пирогидролит, кристаллизация, гидролитическое осаждение, экстракция растворителем [1-3].

При солянокислом травлении углеродистых сталей происходит накопление отработанного травильного раствора, содержащего хлорид железа FeCl_2 и непрореагировавшую соляную кислоту HCl . В работе [4] была рассмотрена технологическая система, позволяющая вернуть соляную кислоту в технологический цикл и получить товарный сульфат двухвалентного железа, удовлетворяющий требованиям ГОСТ. Гептагидрат сульфата железа ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) представляет собой товарный материал, который используется в качестве коагулянта для обработки воды, а также для дезодорации сточных вод.

Для получения и выделения сернокислого железа перед процессом дистилляции в ОТР вводится концентрированная 96%-ная серная кислота. При этом протекает реакция $\text{FeCl}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4 = 2\text{HCl} + \text{FeSO}_4$. Высвобожденную соляную кислоту извлекают вместе с исходной свободной соляной кислотой путем дистилляции, в то время как железо остается в растворе в виде моногидрата сульфата железа.

Исследование процесса дистилляции проводилось на лабораторной установке, включающей в себя: колбонагреватель, куб-испаритель, термометры для определения температуры кубовой жидкости и паров соляной кислоты, холодильник для конденсации и охлаждения паров кислоты, емкость для приема дистиллята. В случае проведения процесса дистилляции под вакуумом подключается вакуум-насос, краном регулируется разрежение в системе.

В процессе дистилляции происходит испарение HCl , пары которой вместе с парами воды поступают в конденсатор-холодильник. При проведении процесса при атмосферном давлении концентрация соляной кислоты в дистилляте на начало отгона может составлять порядка 38%, в дальнейшем содержание кислоты в дистилляте снижается. Дистиллят отбирался фракционно, с целью определения кинетики снижения концентрации соляной кислоты.

В процессе дистилляции контролировались следующие параметры: температура отгоняемых паров, рабочего раствора в испарительной колбе, фиксировалась мощность колбонагревателя. Замерялся объем конденсата паров соляной кислоты (для определения степени отгона), а также количество кубовой жидкости, оставшейся в испарителе после окончания процесса. На графике рис. 1. представлены зависимости массовой концентрации соляной кислоты в дистилляте x_D от степени отгона S . Под степенью отгона понимается отношение объема исходного ОТР к объему кубового остатка.

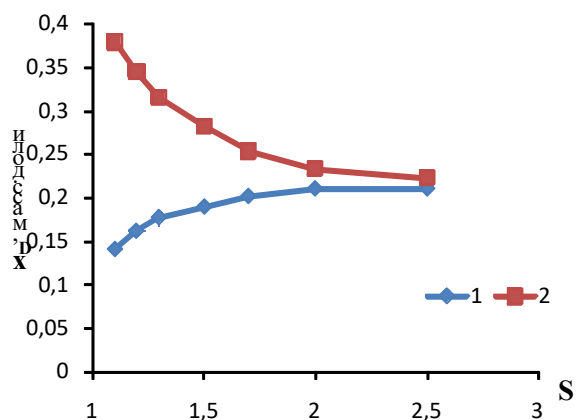


Рисунок 1 - Зависимость концентрации дистиллята от степени отгона.
1 – без введения H_2SO_4 , 2 – с введением H_2SO_4

Дистилляции подвергался ОТР с содержанием ионов Fe^{2+} 100 г/л и ионов Cl^- 312 г/л. В случае дистилляции исходного ОТР (кривая 1 на Рис.1) концентрация HCl в начале процесса составила 14,2 %, а при степени отгона $S=2,5$ увеличилась до 21,8 %. При степенях отгона 2 и 2,5 концентрация дистиллята одинакова, что можно объяснить достижением азеотропной точки. Степень выделения HCl составила 66% от количества свободной кислоты в ОТР и 39% от суммарного количества свободной и связанной кислоты в ОТР. Кривая 2 на рис.1 характеризует изменение концентрации HCl в дистилляте при предварительном введении в ОТР серной кислоты с избытком 5% относительно стехиометрического количества. Концентрация свободной кислоты в растворе увеличивается, и как следствие возрастает концентрация HCl в дистилляте в начале процесса до 37,9 %. В дальнейшем концентрация кислоты в дистилляте уменьшается и при степени отгона 2,5 составила 22,3 %. Средняя концентрация кислоты, полученной при дистилляции исходного ОТР составила 18,9 %. Средняя концентрация дистиллята при введении серной кислоты увеличилась до 29,2 %. Степень выделения HCl составила 63,8%.

Анализ процесса дистилляции удобно проводить, используя диаграмму составов (рис.2).

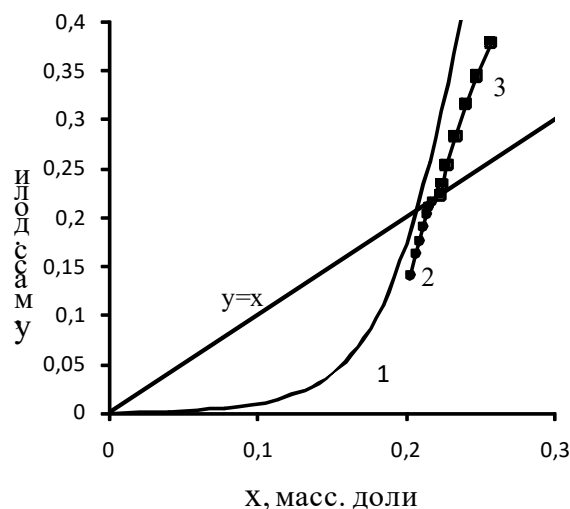


Рисунок 2 - Диаграмма составов: 1 - равновесная линия, 2 – процесс без введения H_2SO_4 , 3 – с введением H_2SO_4

Поскольку при проведении опытов осуществлялась полная конденсация выходящих из куба паров, состав паровой фазы равен составу фракций дистиллята ($y=x_D$). Средняя за время отбора каждой фракции концентрация HCl в испарительной колбе рассчитывалась на основе уравнения материального баланса процесса разделения. Таким образом, получены координаты точек, принадлежащих линии, характеризующей ход процесса дистилляции на диаграмме составов (рис.2). Кроме того, на диаграмму нанесены линия равных составов ($y=x$) и равновесная линия для системы $HCl-H_2O$ по данным [5].

При дистилляции исходного ОТР рабочая линия процесса (линия 2 рис.2) расположена ниже линии равных составов паровой и жидкой фаз. Концентрация HCl в парах меньше, чем в жидкой фазе. Вследствие этого уменьшается содержание воды в растворе и увеличивается концентрация HCl . Это приводит к увеличению концентрации HCl в паровой фазе, а значит и в получаемом дистилляте. При достижении рабочей линией линии равных концентраций рост концентрации HCl в дистилляте прекращается (верхняя точка линии 2).

Эффективным методом разделения азеотропных смесей служит экстрактивная дистилляция [6], характерной особенностью которой является введение разделяющего агента, неодинаково влияющего на летучесть компонентов смеси. При введении в ОТР серной кислоты перед дистилляцией рабочая линия процесса лежит выше линии равных составов. В начале процесса достигается максимальная концентрация HCl в парах и в дистилляте. Концентрация HCl в парах выше, чем в жидкой фазе. Это приводит к уменьшению концентрации HCl в жидкой фазе и в получаемом дистилляте. Снижение содержания HCl в дистилляте происходит до достижения равных концентраций паровой и жидкой фаз. Этот процесс отображает линия 3 на рис.2.

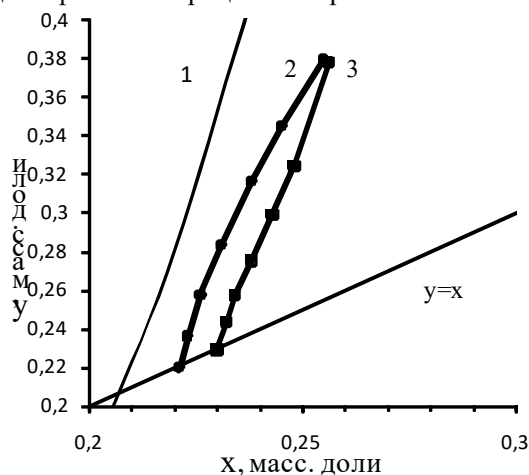


Рисунок 3 - Диаграмма составов: 1 - равновесная линия $P_w=0$, 2 – рабочая линия $P_w=0,5$ атм, 3 – рабочая линия $P_w=0,7$ атм

На рис.3 приведены рабочие линии процесса дистилляции ОТР при разных значениях разрежения P_w в системе. Предварительно вводилась серная кислота с избытком 5% относительно стехиометрического количества. Рабочие линии построены на основе экспериментальных точек, характеризующих действительные концентрации HCl в паровой и жидкой фазах. Снижение давления в системе приводит к сдвигу рабочей линии и азеотропной точки вправо. Концентрация регенерированной кислоты повышается.

Таким образом установлено, что введение серной кислоты и понижение давления в системе при дистилляции солянокислого ОТР позволяет повысить концентрацию регенерированной соляной кислоты.

Список литературы

1. Аксенов В.И. Травильно-регенерационные комплексы. - М.: Теплотехник, 2006.
2. Aditya Agrawal, Navneet Naman, Sanjeev Kumar Dubey. A review on regeneration process of waste pickling acid at steel industries // International Journal of Engineering Research and Reviews, 2014. Vol. 2. Issue 4. P. 70-73.
3. Быковский, Н. А. Регенерация травильного раствора, используемого в производстве печатных плат / Н. А. Быковский, Л. Н. Пучкова, Н. Н. Фанакова // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2023. – № 6(146). – С. 137-145.
4. Кротова В.М., Поворов А.А., Липин А.Г., Липин А.А. Регенерация отработанного травильного раствора / Повышение энергоресурсоэффективности, экологической и технологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности: сборник научных трудов международного научно-технического симпозиума, посвящённого 120-летию со дня рождения П. Г. Романкова (ISTS «EESTE-2024»): Т. 2 / М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А. Н. Косыгина», 2024. – с.132-134.
5. Левинский М.И., Мазанко А.Ф., Новиков И.Н. Хлористый водород и соляная кислота. М.: Химия, 1985. 160с.
6. Sanap P.P., Mahajan Y.S. Ethyl alcohol -water separation by extractive distillation: Simulation using Aspen Plus™ and experimental validation. ChemChemTech[Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].2024. V. 67. N3. P. 86-93.

УДК 66.047.7: 661.152.5

Назаров В.И., Макаренков Д.А., Кузнецова Н.А., Попов А.П., Калачева В.Р.

Основные закономерности процессов гранулирования методами окатывания неорганических и органических порошков с различной морфологией

Назаров Вячеслав Иванович – к.т.н., доцент, заместитель начальника отдела;

Макаренков Дмитрий Анатольевич – д.т.н., доцент, первый заместитель руководителя КПХИ (ИРЕА) по научной работе;

Попов Александр Павлович – научный сотрудник.

НИЦ «Курчатовский институт»,

Россия, Москва, 123182, площадь Академика Курчатова, 1.

Кузнецова Наталья Анатольевна – к.т.н., доцент, доцент, nkuznetsova@list.ru

МИРЭА – Российский технологический университет,

Россия, Москва, 119454, Пр-т Вернадского, д. 78

Калачева Виктория Радиковна – студент,

Московский политехнический университет,

Россия, Москва, 107023, Большая Семеновская, дом 38.

В тезисах рассмотрен вопрос разработки процесса получения сбалансированных гранулированных минеральных удобрений с микроэлементом в хелатной форме. Объектами исследования выбраны: водный раствор хелата цинка, минеральные носители (известняк, гидроксид магния и доломитовая и фосфоритная мука). Приведена конструкция тарельчатого гранулятора. Приведены результаты исследований гранулирования микроэлемента в хелатной форме на минеральных носителях различных типов по двум механизмам гранулообразования. Получены результаты исследования структуры и гранулометрического состава.

Ключевые слова: гранулирование, окатывание, микроэлементы, хелаты, порошки, минеральный носитель

The main patterns of granulation processes by pelletizing inorganic and organic powders with different morphologies

Nazarov V.I.¹, Makarenkov D.A.¹, Kuznetsova N.A.², Popov A. P.¹, Kalacheva V.R.³,

¹ NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation

² MIREA - Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

³ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

The issue of developing a process for obtaining balanced granular mineral fertilizers with a trace element in chelated form is considered in the theses. The objects of the study are: an aqueous solution of zinc chelate, mineral carriers (limestone, magnesium hydroxide, and dolomite and phosphorous flour). The design of a poppet granulator is given. The results of studies of granulation of a trace element in chelated form on mineral carriers of various types by two mechanisms of granulation are presented. The results of the study of the structure and granulometric composition were obtained.

Keywords: granulation, pelletizing, trace elements, chelates, powders, mineral carrier

Введение

В настоящее время повышение эффективности технологических процессов в агропромышленном комплексе, в химической, металлургической, строительной, комбикормовой и других отраслях промышленности решаются переводом порошкообразных и зернистых сред в гранулированный продукт (сферические гранулы, таблетки, пеллеты, плитка, брикеты). Кроме того, технология гранулирования используется при переработке твердых отходов, являющихся техногенным сырьём или вторичными материальными ресурсами (ВМР).

Широкое распространение получили гранулированные минеральные удобрения. При получении минеральных удобрений наряду с простыми и сложными удобрениями (типа РК, NPK) появляются модернизированные NPKS структурированные рецептуры. К ним относятся также известковая аммиачная селитра (CAN) и органоминеральные удобрения (ОМУ). Для ряда удобрений используют местное сырьё и отходы, такие как торф, сопропель, золы и шламы с серноокислым магнием. Для их получения широко используются методы окатывания в барабанных аппаратах и на тарельчатых грануляторах [1]. Для повышения качества минеральных удобрений в агрохимии дополнительно используются микроэлементы (соли железа, бора, марганца, меди, молибдена, цинка, кобальта). Для улучшения усвояемости микроэлементы переводят в хелатную форму.

Экспериментальная часть

В Курчатовском комплексе химических исследований (ИРЕА) был разработан способ получения гранулированных микроэлементов (МЭ) в хелатной форме с использованием минеральных носителей (МН). Объектами исследования выбраны водный раствор хелата цинка, минеральные носители – известняк, гидроксид магния (брусит), доломитовая и фосфоритная мука [2].

Гранулированные хелатные микроэлементы на минеральном носителе получали методом окатывания на тарельчатом грануляторе. При этом использовали в качестве связующего диспергированную смесь водного раствора микроэлемента цинка и жидкости на основе лигносульфонатов «Биопан-Б2» (Б2). Гранулирование минерального носителя осуществляли на тарельчатом грануляторе в динамическом режиме при превышении критической частоты вращения с использованием отбойных элементов (рис. 1) [3]. Частоту вращения меняли с использованием частотного преобразователя, а угол наклона тарели изменяли с помощью регулятора. Место ввода сухого продукта и связующего определяется требованиями к гранулометрическому составу. Для получения крупных гранул материал загружают в нижнюю часть тарели, а орошение проводят в верхней части поднимающегося слоя. Это позволило увеличить используемую поверхность тарельчатого гранулятора до 60-70%, что позволяет интенсифицировать процесс гранулирования. При исследовании размер исходных частиц минерального носителя составлял 100-200 мкм, число оборотов тарели $n=28-56$ об/мин, угол наклона тарели $\alpha=40-45$ град. В процессе работы изменяли соотношение МН:(МЭ:Б2) (см. табл.1).

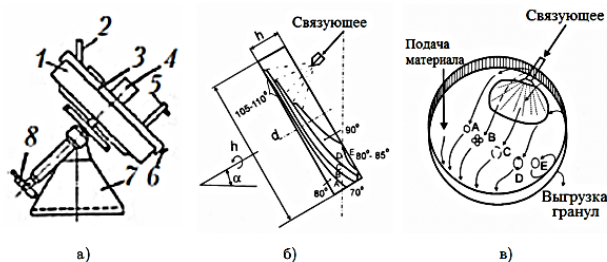


Рисунок 1 - Тарельчатый гранулятор (а) и способы подачи материала и связующего на днище тарели (б,в):

1 – тарель; 2 – патрубок для порошка; 3 – кожух; 4 – патрубок; 5 – патрубок для ввода связующего;
6 – патрубок для подачи гранул на сушку; 7 – станина; 8 – устройство для регулирования угла наклона тарели.

Процесс гранулирования на тарели осуществляется следующим образом. Из порошкообразных материалов, движущихся по поверхности тарели, образуются гранулы за счет взаимодействия частиц под действием диспергированных капель связующего. Возможно два механизма процесса гранулирования. В первом случае работает агломерационный механизм получения гранул из мелкодисперсных частиц за счет адгезионных сил взаимодействия между частицами и высокой концентрацией связующего. При заданном времени пребывания материала на тарели происходит рост гранул.

По второму механизму при малом количестве влаги (от 13 до 16%) она распределяется по поверхности частицы в виде капель с образованием плёнки, и при сушке видно, что гранулы имеют сферическую форму (см. рис. 2а). Для обоих механизмов гранулирования важную роль играет смачиваемость гранулированных порошков, характеристикой которой является краевой угол смачивания [4].

Сушку продукта проводили в сушильном шкафу при температуре 105 °С, прочность гранул определяли с помощью измерителя YD-II, а содержание цинка в гранулах – методом АЭС-ИСП. В результате были получены плотно-прочные гранулы в виде окатанных агломератов. Их характеристики приведены в табл. 1.

Таблица 1

Массовые соотношения используемых компонентов и результаты измерения характеристик получаемых гранул

Минеральный носитель, г	Массовое соотношение компонентов МН:(МЭ:Б2)	Содержание цинка в гранулированном продукте, % масс.	Прочность гранул $d=(2-3)$ мм, Н/гранулу	Основная фракция гранулированного продукта
Известняк	300:(30:30)	0,25	20,5	(1-4) мм
Гидроксид магния (брусит)	400:(40:40)	0,33	25,0	(1-3) мм
Фосфоритная мука	500:(40:40)	0,60	56,9	(2-4) мм
Доломитовая мука	600:(51:51)	-	-	(1-4) мм

Из табл. 1 видно, что наиболее прочными получаются гранулы из фосфоритной муки при повышенном содержании цинка по сравнению с другими носителями. Это объясняется высокой смачиваемостью частиц фосфоритной муки при окатывании. Результаты анализа грансостава приведены на рис. 2.

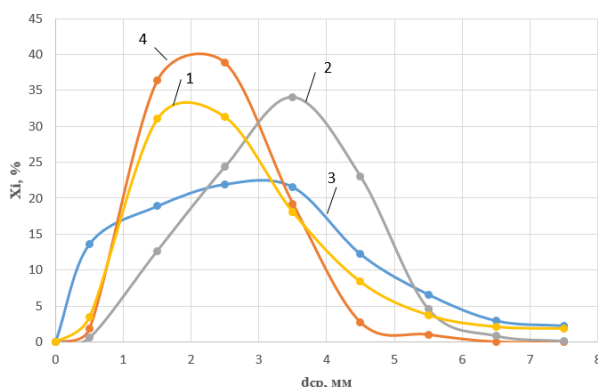


Рисунок 2 – Дифференциальные кривые распределения состава полученных гранул: 1 – на основе доломитовой муки; 2 – на основе фосфоритной муки; 3 – на основе известняка; 4 – на основе брусита (гидроксида магния)

Из рис. 2 видно, что при использовании доломитовой муки и брусита получаются продукты узкого гранулометрического состава, где действует механизм распределения капель по поверхности частиц. Кривые грансостава при использовании фосфоритной муки и известняка характеризуются агломерационным механизмом образования гранул. Минеральные носители обладают различной смачиваемостью, что связано с физико-механическими свойствами веществ. Поскольку процесс идет на тарельчатом грануляторе, то большую роль играет количество вводимой влаги. В среднем вводится от 13 до 20% масс. Жидкости. На рис.3. представлены микрофотографии гранул при различной влажности.

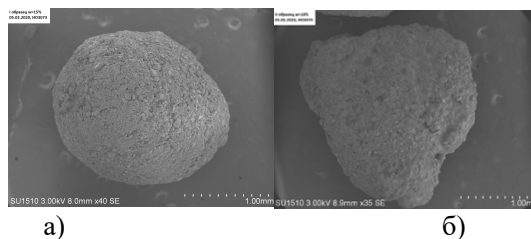


Рисунок 3 - Микрофотографии образцов гранул молотого известняка с хелатом цинка и биопана Б-2 при влажности: а) 15%; б) 18%

При малом количестве влаги (от 13 до 16%) получают сферические гранулы, а при влажности от 16 до 18 % получают гранулы в виде агломератов неправильной формы. Таким образом, рост размера гранулы определяется размером исходной механоактивированной частицы (пористой формы) и количеством образующейся пленки на ее поверхности.

На рис. 4 представлена зависимость распределения состава гранул на основе молотого известняка

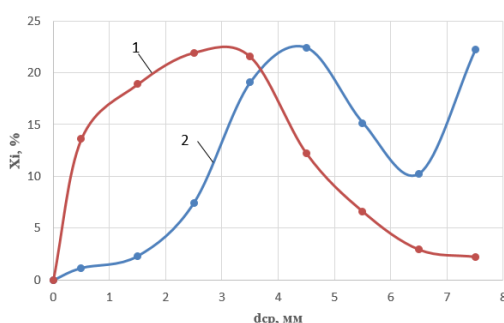


Рисунок 4 - Дифференциальная кривая распределения гранул по размерам на основе молотого известняка:

1 – влажность 15%, 2 – влажность 18%.

Из рис. 4 видно, что количество влаги 18% является избыточным, что приводит к образованию агломератов с размером от 6 до 7,5 мм.

Заключение

Увеличивающийся рынок комплексных гранулированных минеральных удобрений, получаемых из порошков с различной морфологией, потребовал исследований процесса структурообразования. При этом, необходимо разработать процесс получения сбалансированных гранулированных минеральных удобрений с макро и микроэлементами в хелатной форме. Создание процесса получения таких удобрений позволит повышать урожайность сельскохозяйственных культур. Результаты исследований позволили определить возможность гранулирования микроэлемента в хелатной форме на минеральных носителях различных типов по двум механизмам гранулообразования.

Список литературы

1. Назаров В. И. Техника и технология совмещенных процессов переработки твердых отходов/ В.И. Назаров, Р.А. Санду, Д.А. Макаренков, Н.Е. Николайкина. Москва, ИНФРА-М, 2020, 456 с.
2. Назаров В.И., Макаренков Д.А., Попов А.П., Афлятунова Г.Р., Трубачев Н. Ю. Разработка процессов и технологий получения порошков и гранул микроэлементов методами распылительной сушки и окатывания на тарельчатом грануляторе// Промышленные процессы и технологии. 2022. Т. 2. № 1, С. 66-77.
3. Патент 2515293 Российская Федерация МПК В01J 2/14. Способ гранулирования дисперсных материалов/ Макаренков Д.А., Назаров В.И., Санду Р.А.; заявитель и патентообладатель Министерство образования и науки Российской Федерации Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт химических реактивов и особо чистых химических веществ» — №2012157313/05; заявл. 27.12.2012; опубл. 10.05.2014, Бюл. № 13 — 8 с.
4. Ильина Т.Н. Процессы агломерации в технологиях переработки дисперсных материалов: монография/ Т.Н. Ильина. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2009. – 229 с.

УДК 66.023.2

Макушева И.В., Абиев Р.Ш.

Экспериментальное исследование и численное моделирование гидродинамики в микрореакторах с тангенциальным, радиальным и осевым вводом потоков

Макушева Ирина Владимировна – ассистент, makusheva2012@yandex.ru

Абиев Руфат Шовкетович – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой оптимизации химической и биотехнологической аппаратуры;

ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)"

190013, г. Санкт-Петербург, проспект Московский, дом 24-26/49, литер А

Эффективность химических реакций по своей сути зависит от физического процесса смешения, поскольку для протекания реакции реагенты должны вступать в контакт друг с другом на молекулярном или ионном уровне. Цель данной работы – сравнение качества микросмешения и удельной скорости диссипации энергии в микрореакторах с тангенциальным, радиальным и осевым вводом потоков, при идентичной геометрической форме и объеме. Методы исследования – экспериментальные (определение качества микросмешения и удельной скорости диссипации энергии) и численные (исследования гидродинамики, включая удельную скорость диссипации энергии). Адекватность численного моделирования подтверждена результатами обработки экспериментальных измерений. Результаты данного исследования оказывают существенное влияние на выбор метода высокоэффективного синтеза при микросмешении в микрореакторах с интенсивно закрученными потоками (способа ввода растворов реагентов), а также на выбор оптимальных скоростей подачи растворов.

Ключевые слова: микрореактор, закрученные потоки, микросмешение, удельная скорость диссипации энергии, йодид-йодатная реакция

Experimental study and numerical modeling of hydrodynamics in microreactors with tangential, radial and axial flow input

Makusheva I.V.¹, Abiev R.Sh.¹

¹ Saint Petersburg State Institute of Technology, Saint Petersburg, Russia

The effectiveness of chemical reactions in essence depends on the physical process of mixing, since for the course of the reaction, the reagents must come into contact with each other at the molecular or ionic level. The purpose of this work is a comparison of the quality of microsprical and the specific energy dissipation rate in microreactors with tangential, radial and axial input of flows, with an identical geometric form and volume. Research methods - experimental (determining the quality of micromixing and specific energy dissipation rate) and numerical (studies of hydrodynamics, including the specific rate of energy dissipation). The adequacy of numerical modeling is confirmed by the results of the processing of experimental measurements. The results of this study have a significant impact on the choice of the method of highly effective synthesis during micromixing in microreactors with intensively swirled flows(method of input solutions of reagents), as well as the choice of optimal velocities for the supply of solutions.

Key-words: microreactor; swirling flows; micromixing; energy dissipation rate; iodide-iodate reaction technique.

Введение

Смешение жидкостей используется в химической промышленности для проведения массообменных процессов растворения, эмульгирования, кристаллизации, экстракции, так и сопряженных с ними химических процессов (гомофазных и гетерофазных химических реакций, реактивной экстракции). Эффективность химических реакций по своей сути зависит от физического процесса смешения, поскольку для протекания реакции реагенты должны вступать в контакт друг с другом на молекулярном или ионном уровне [1].

При исследовании смешения в химических реакторах учитывают следующие уровни: макросмешение (гомогенизацию градиентов концентрации в масштабе размера оборудования), микросмешение (смешение на уровне ниже масштаба Колмогорова) и мезосмешение (промежуточный уровень) [1, 2].

Экспериментальная часть

В данной работе проведено сравнение качества микросмешения и удельной скорости диссипации энергии в микрореакторах с тангенциальным, радиальным и осевым вводом потоков, при идентичной геометрической форме и объеме.

На рис. 1 показаны способы подачи жидкостей в микрореакторы.

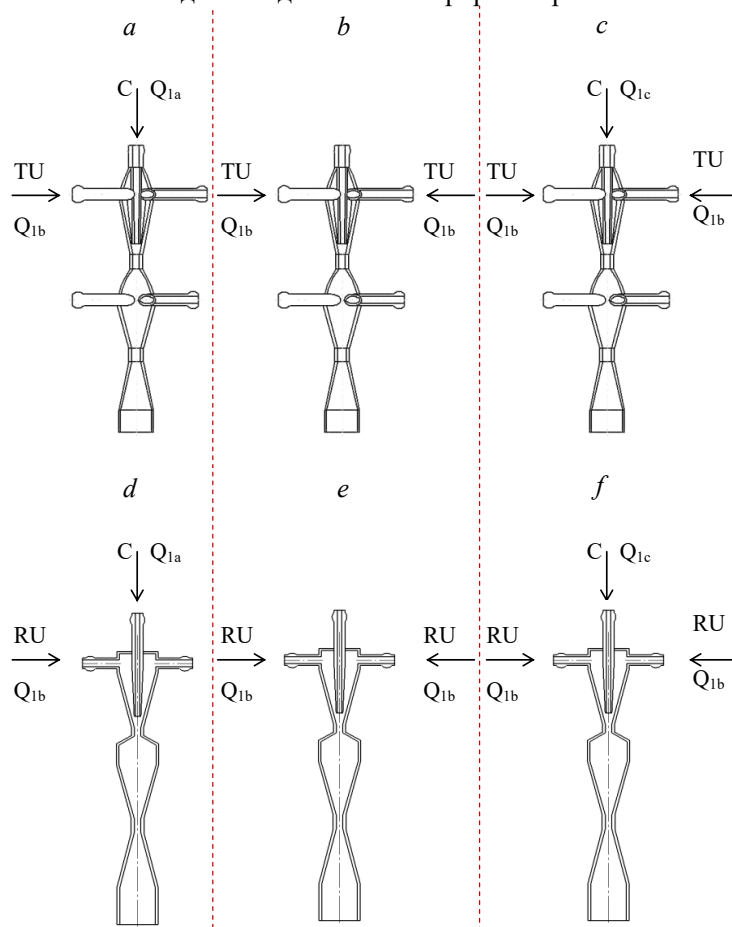


Рисунок 1 – Способы подачи жидкостей в микрореакторы: а – через верхний тангенциальный и центральный патрубки MRISF-2 (TU+C); б – через два верхних тангенциальных патрубка MRISF-2 (TU+TU), расположенных друг напротив друга; с – через два верхних тангенциальных и центральный патрубки MRISF-2 (TU+TU+C); д – через радиальный и центральный патрубки MRSIJ-2 (RU+C); е – через два радиальных патрубка MRSIJ-2 (RU+RU), расположенных друг напротив друга; с – через два радиальных и центральный патрубки MRSIJ-2 (RU+RU+C).

Для сравнения исследованы способы подачи через два тангенциальных (TU+TU) и через два радиальных (RU+RU), тангенциальный и осевой (TU+C) и радиальный и осевой (RU+C). Кроме того, помимо обычно изучаемой подачи растворов через два патрубка особо исследован случай подачи растворов сразу в три патрубка – два тангенциальных и осевой (TU+TU+C), а также в два радиальных и осевой (RU+RU+C). Этот случай соответствует подаче трех растворов в первую камеру, который используется в некоторых видах синтеза наноразмерных частиц неорганических материалов.

Удельную скорость диссипации энергии рассчитывали по формуле:

$$\varepsilon = \frac{N}{V\rho}, \quad (1)$$

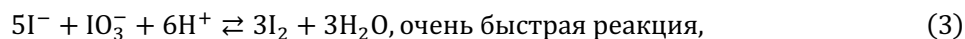
где ε – удельная скорость диссипации механической энергии (Вт/кг);

N – мощность, затраченная на перемещение жидкости в аппарате (диссипированная мощность) (Вт);

ρ – плотность жидкости (кг/м³);

V – объем жидкости, в котором рассеивается энергия (м^3).

Микросмешение в микрореакторах определялось по йодид-иодатной методике, которая основана на использовании системы конкурентных параллельных реакций [3]-[4]:



Окислительно-восстановительная реакция (3) протекает быстро, в том же диапазоне, что и процесс микросмешения, однако намного медленнее реакции нейтрализации (2) [3].

Зависимость индекса сегрегации от удельной скорости диссипации энергии приведена на рис.2.

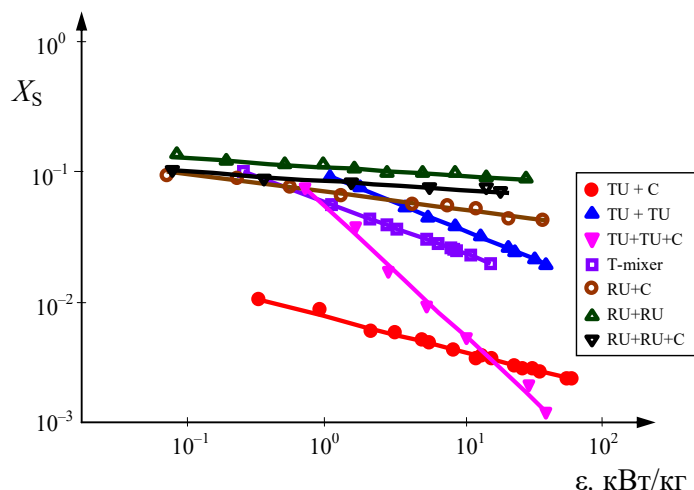


Рисунок 2 – Зависимость индекса сегрегации X_S от удельной скорости диссипации энергии $\epsilon_{\text{neck.exp}}$ (кВт/кг) в MRISF-2 и MRSIJ-2

Лучшее микросмешение наблюдается при способе TU+C (наименьшие значения индекса сегрегации из рассмотренных), а худшие – при способе RU+RU (наибольшие значения индекса сегрегации). Закрутка даёт лучшие значения индекса сегрегации (X_S на 1-2 порядка ниже для TU+C, чем для RU+C и RU+RU).

На рис. 3 приведено сравнение удельной скорости диссипации энергии в двух микрореакторах.

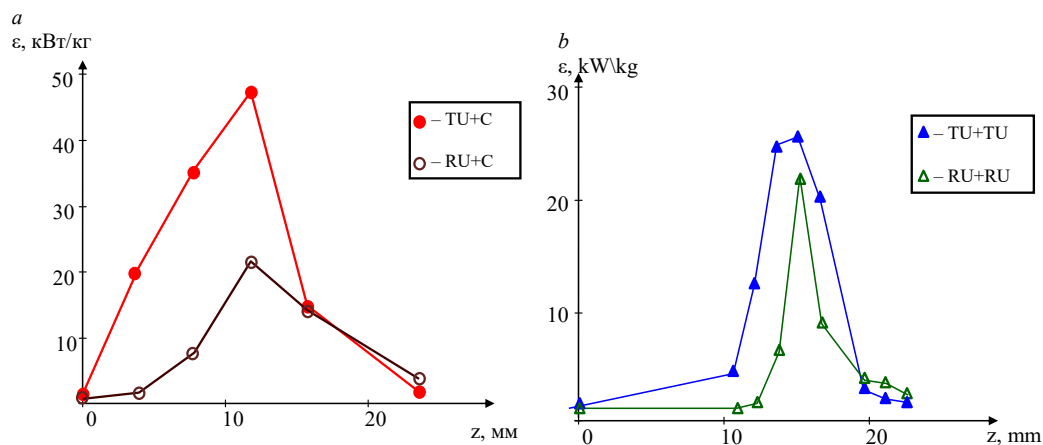


Рисунок 3 - Зависимость относительной удельной скорости диссипации энергии от координаты сечения: а – способы подачи TU+C и RU+C; б – способы подачи TU+ TU и RU+RU

У всех четырёх способов подачи сечением с наибольшими значениями удельной скорости диссипации энергии является 2.3, однако в TU+TU удельная скорость диссипации энергии не так сильно вырастает по сравнению с сечением 2.2.

Удельная скорость диссипации энергии в сечении 2.3 (сечение с наибольшими значениями ϵ) в TU+C в 2.2 раза превышает удельную скорость диссипации энергии для RU+C в том же сечении 2.3.

Заключение

В ходе работы доказано, что закрутка даёт лучшие значения индекса сегрегации (X_S на 1-2 порядка ниже для TU+C, чем для RU+C и RU+RU). Также замечено, что для MRISF-2 влияние удельной скорости диссипации энергии и расхода на качество микросмешения больше, для микрореактора без закрутки

Из этого можно сделать следующие выводы: 1) использование закрутки (подача в тангенциальные патрубки) позволяет достичь более высокого качества микросмешения, чем при отсутствии закрутки (подача в радиальные патрубки) при всех способах подачи; 2) первичный контакт реагентов в зоне горловины позволяет получить качество микросмешения выше, чем при первичном контакте реагентов в зоне верхней камеры (TU+C и TU+TU+C показывают результаты лучше, чем TU+TU, RU+C и RU+RU+C – лучше, чем RU+RU); 3) при больших расходах качество микросмешения при способе подачи TU+TU+C в MRISF-2 выше, чем при способе TU+C.

Список литературы

1. Абиев Р.Ш., Макушева И.В. Влияние макро- и микросмешения на процессы растворного синтеза частиц оксидных материалов в микроаппаратах с интенсивно закрученными потоками // Теор. основы хим. технол. 2022. Т. 56. № 2. С. 137
2. Mao, Z., Yang, C., 2017. Micro-mixing in chemical reactors: a perspective. Chin. J. Chem. Eng. 25 (4), 381–390, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cjche.2016.09.012>
3. Guichardon, P., Laurent, Falk. Characterisation of Micromixing Efficiency by the Iodide-Iodate Reaction System. Part I: Experimental Procedure. Chemical Engineering Science. 2000. 55. 4233-4243. DOI:10.1016/S0009-2509(00)00068-3.
4. Falk L., Commenge J.-M. Performance comparison of micromixers // Chem. Eng. Sci. 2010. V. 65. P. 405411. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.05.045>

УДК 546.65

Мередова Х.А., Халлаев Х.Х.

Способы переработки фосфогипса и природного гипса в безотходную продукцию

Мередова Хурма Аннамередовна- преподаватель, meredowahurma167@gmail.com;

Халлаев Халаяз Хыдырович- преподаватель;

Туркменский государственный архитектурно-строительный институт, 774025, г.Ашхабад ул.1916 (Б.Аннанов) д.136

Гипс является одним из основных материалов в строительной отрасли. При взаимодействии фосфогипса и природного гипса с аммиаком и углекислым газом можно получить строительный мел и сульфат аммония. Правильная переработка отходов, образующихся в результате этого производства в полезные продукты, в значительной степени способствует предотвращению загрязнения окружающей среды. Лабораторные исследования показали, что при переработке фосфогипса и достаточной нейтрализации известью происходит 100% связывание фтора, а свойства вяжущего, соответствуют нормативу.

Ключевые слова: фосфогипс, аммиак, сульфата аммония, строительный мел.

Methods of processing phosphogypsum and natural gypsum into waste-free products

Meredova K.A., Hallaev K.H.

Turkmen State Institute of Architecture and Civil Engineering, Ashgabat, Turkmenistan

Gypsum is one of the main materials in the construction industry. When phosphogypsum and natural gypsum interact with ammonia and carbon dioxide, it is possible to obtain construction chalk and ammonium sulfate. Proper processing of waste generated as a result of this production into useful products significantly contributes to the prevention of environmental pollution. Laboratory studies have shown that when processing phosphogypsum and sufficiently neutralizing it with lime, 100% of fluorine is bound, and the properties of the binder comply with the standard.

Key words: phosphogypsum, ammonia, ammonium sulfate, construction chalk.

Фосфогипс и природный гипс содержат до 90% гипса CaSO_4 . Гипс является одним из основных материалов в строительной отрасли. На его основе изготавливают также декоративную плитку. При взаимодействии фосфогипса и природного гипса с аммиаком и углекислым газом можно получить строительный мел и сульфат аммония — минеральное удобрение. Строительная древесина является сырьем для строительной промышленности. На его основе производятся различные виды шпатлевок. Поэтому необходимо проводить глубокие и соответствующие научные исследования в этих областях с целью развития соответствующих отраслей.

Нанотехнологии, химические технологии, изучение новых материалов, энергетика являются приоритетными направлениями науки в нашей стране. Поэтому необходимо проводить глубокие и соответствующие научные исследования в этих областях с целью развития соответствующих отраслей. Созданы все возможности для изучения международного опыта и подготовки молодых специалистов, способных осваивать современные методы и новые инновационные технологии в сфере науки и образования.

Химическая промышленность играет стратегически важную роль в развитии инновационного направления национальной экономики, создании новых отраслей, увеличении отечественного производства разнообразной конкурентоспособной продукции, замещающей импортные товары для удовлетворения внутренних потребностей, а также выпуске экспортно-ориентированной продукции [1].

Проводимая в этой области политика направлена на планомерное и эффективное использование наших природных ресурсов. К числу стратегически важных задач относится не только добыча сырья, но и его глубокая переработка на основе новейших достижений науки и техники, что позволяет выпускать разнообразную высококачественную продукцию, пользующуюся большим спросом как на внутреннем, так и на внешнем рынках.

Как одно из основных направлений бурно развивающейся и совершенствующейся науки, в нашей стране создаются все условия для проведения научных исследований, проведения экспериментов и всестороннего развития технологических разработок в области химии. Последовательно укрепляется материально-техническая база Академии наук Туркменистана, отраслевых научно-исследовательских институтов и высших учебных заведений. В химической отрасли, как и в других

отраслях промышленности, внедряются цифровые информационно-коммуникационные технологии, обеспечивающие доступ к мировым научным данным [2].

Фосфогипс — отход, образующийся в качестве побочного продукта при обработке фосфатных руд серной кислотой с целью получения экстракционной фосфорной кислоты.

В настоящее время одной из главных задач является разработка научных основ перспективных технологий комплексной переработки техногенных отходов и получения из них необходимой народному хозяйству продукции. Химическое производство в нашей стране, развивается быстрыми темпами. Объемы выбросов побочных продуктов при этом составляют несколько миллионов тонн, и эти отходы оказывают вредное воздействие на окружающую среду. Основную часть этих выбросов составляет фосфогипс, который образуется при обработке фосфорсодержащего сырья серной кислотой.

По расчетам запасы фосфогипса, образующегося как побочный продукт производства фосфорной кислоты на химическом комбинате Туркменабада, превышают 10 млн тонн.

Строительная известь служит важным материалом в строительной отрасли, а сульфат аммония является ценным минеральным удобрением для зерновых культур и широко применяется в сельском и народном хозяйстве.

Предприятия, перерабатывающие горную породу для производства минеральных удобрений, являются отраслями промышленности, выбрасывающими вредные отходы в окружающую среду. Они оказывают определенное техногенное воздействие на окружающую среду, включая воду, пастбища и атмосферный воздух. Фосфорное сырье всегда содержит 2,5–3,5% фтористых соединений по массе.

Химическое предприятие в Туркменабате в основном использует фосфоритовую руду, импортируемую с месторождения Каратау в Казахстане. При переработке фосфоритной муки для получения экстракционной фосфорной кислоты фтор выделяется в виде кремнефтористоводородной кислоты, которую можно использовать при производстве фтористых солей. При переработке фосфоритов Каратау фтористые соединения, содержащиеся в сырье, переходят в удобрения и приводят к загрязнению почвы фторидами. В настоящее время в связи с большим использованием минеральных удобрений в сельском хозяйстве ощущается нехватка удобрений, производимых из апатитового концентрата, поэтому стали широко использовать фосфоритовую руду, добываемую на месторождении Каратау [3].

Правильная переработка отходов, образующихся в результате этого производства, в полезные продукты в значительной степени способствует предотвращению загрязнения окружающей среды. Рациональное использование фосфоритового сырья, являющегося отходом производства, позволит решить экономические и экологические проблемы. При переработке апатитов фтор удаляется в виде фторосиликата и фторкремниевой кислоты. При переработке фосфоритов Каратау образуется большое количество соединений фтора. При производстве аммофоса на основе фосфорной кислоты в его состав вводится 70% от общего количества фтора. В результате сложных физико-химических превращений большая часть фтора переходит в экстракционную фосфорную кислоту, некоторая часть переходит в газовую фазу, а остальная часть остается в фосфогипсе.

Прямое использование фосфогипса: безотходная термическая переработка с получением серной кислоты и цемента (извести); сульфат аммония и фосформетилен путем конверсии и использования в качестве материалов для строительной промышленности; используют как пигмент, используют как наполнитель для бумаги и резины. Кроме того, известно, что они используются в различных отраслях народного хозяйства. Фосфогипс иногда используют для улучшения мелиоративных свойств засоленных и заболоченных почв. Он также напрямую используется в сельском хозяйстве. Однако для некоторых почв фосфогипс не подходит: высокое содержание сульфата кальция в его составе приводит к затвердению почвы, а некоторые культуры нуждаются в меньшем количестве сульфат-ионов, поэтому он оказывает на них отрицательное воздействие. Поэтому фосфогипс выгодно перерабатывать с целью получения удобного строительного материала и питательного минерального удобрения – сульфата аммония [4].

Строительный гипс на основе фосфогипса служит важным материалом в строительной отрасли и производстве минеральных удобрений, как стабилизирующая добавка, а сульфат аммония является ценным минеральным удобрением для зерновых культур и широко применяется в сельском хозяйстве и народном хозяйстве. Важной научной проблемой является обеспечение наличия местного сырья для производства полезной продукции, разработка на их основе удобных способов получения строительных растворов и сульфата аммония из фосфогипса, изучение их свойств, изыскание

способов очистки и использования полученных продуктов, внедрение разработанных способов в производство. Состав сырья, а именно фосфогипса, был исследован в лаборатории Института химии Академии наук Туркменистана. На основании этого было определено следующее.

CaSO_4 – 90,092%

Влажность – 13,29%

Сухой остаток – 82,82%

Зольность – 95,40%

Массовая доля органических соединений – 4,60%.

Массовая доля общего фосфора (P_2O_5) – 1,62%

Массовая доля общего калия (K_2O) – 0,92

Массовая доля магния (MgO) – 0,038%

Общая массовая доля кремния (SiO_2) – 13,801%

Массовая доля общего железа (Fe_2O_3) – 1,596 %

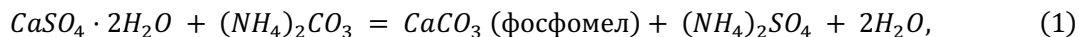
Массовая доля общего алюминия (Al_2O_3) – 0,828%

Рассматривая несколько методов переработки фосфогипса, можно каждую изучать по отдельности. Каждый метод отличается друг от друга физико-химическими характеристиками процесса преобразования. Эти особенности влияют на экономические показатели процесса. Существуют оптимальные условия и способы получения строительного мела и сульфата аммония на основе отхода производства – фосфогипса. Соответственно, фосфогипс, являющийся отходом производства, можно использовать для получения прибыльной продукции. Из гипса, углекислого газа и аммиака получают сульфат аммония и известь, а гипсовую суспензию обрабатывают раствором карбоната аммония. Недостатком этого метода является низкая экономичность процесса переработки гипса, перерасход дорогостоящего аммиака и получение дешевого сульфата аммония. Для решения проблемы переработки гипса необходимо: обработать гипсовую суспензию раствором карбоната аммония с получением извести и сульфата аммония, термически разложить сульфат аммония с получением гидросульфата аммония и аммиака, а затем вернуть аммиак на приготовление раствора карбоната аммония. Приготовив раствор гидросульфата аммония и вспомогательного сульфата, который образует с сульфатом аммония двойной сульфат, осаждают двойной сульфат и удаляют его. Полученный раствор очищают осаждением разбавленной серной кислотой, а очищенный раствор выпаривают до готовой серной кислоты. Двойной сульфат разлагается на сульфат аммония, который используется для разложения гидросульфата аммония с получением аммиака и вспомогательного сульфата, который образует двойной сульфат с сульфатом аммония [5].

Фосфорсодержащие минеральные удобрения часто разлагают фосфорсодержащее сырье под воздействием серной кислоты. Даже в этих случаях образуется большое количество остаточного фосфогипса. (Сульфат кальция $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$).

При производстве 1 тонны фосфорной кислоты P_2O_5 образуется 5-6 тонн побочного продукта – фосфогипса.

Представлена инновационная безотходная технология производства фосфогипса, конверсионный метод производства продукции для строительной отрасли, сельского хозяйства и металлургии. Метод преобразования фосфогипса заключается в растворении фосфогипса в растворе карбоната аммония $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$.

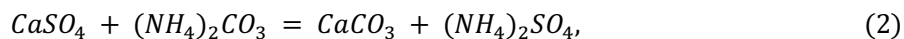


Получаемый сульфат аммония является ценным минеральным удобрением, а цена фосфомела еще выше.

Экспериментальное оборудование представляет собой разлагатель, снабженный мешалкой, термометром и длинным холодильником.

Температуру реакционной смеси контролируют путем нагрева водяной бани. После окончания опыта реакционную массу охлаждают до 20-25 °С и фильтруют через бумажный фильтр под вакуумом 0,2 атм с помощью вакуумного насоса в воронке Бюхнера. Количество сульфата аммония в отфильтрованном влажном осадке определяется по азоту.

По результатам анализа определяют концентрацию сульфата аммония в процентах в стехиометрическом соотношении. Растворение фосфогипса раствором карбоната аммония протекает по следующей реакции:

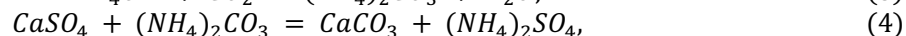
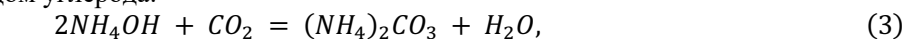


Конверсию проводили при температуре 53-57 °С при постоянном перемешивании в течение 6 часов. Так, содержание сульфата аммония в фильтрате составляет 34,3%, а содержание карбоната кальция во влажном осадке – 53,2% (или 91,3% в сухом осадке).

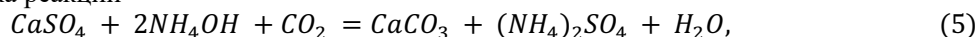
Достигнутый коэффициент конверсии составляет 98,8%.

Состав смеси: после двукратной промывки влажного осадка 2,7% нерастворенного CaSO_4 , 0,9% карбоната аммония, 0,9% сульфата аммония и 0,2% P_2O_5 . Размер частиц осадка составляет 5,8 мкм. Скорость фильтрации пульпы составляет 50-60 кг/(м²·с) [4].

Химия этого процесса преобразования выражается следующим уравнением с фосфогипсом, аммиачной водой и оксидом углерода:



Общая динамика реакции

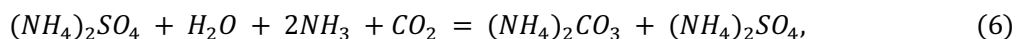


Исходная масса фосфогипса составляла 300 г, смешивалась с аммиачной водой, количество рассчитывалось по реакции с учетом влажности фосфогипса, при этом аммиак брался с избытком 5% от необходимого количества. При достижении необходимой температуры (53-57 °С) в пульпу автоматически с помощью барботера вводили углекислый газ. Через 4-6 часов пульпу фильтровали, а образовавшийся осадок дважды промывали.

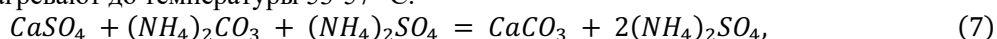
Следует отметить, что в данном методе, как и в методе жидкостной конвекции, продолжительность реакции, превышающая 6 часов, не оказывает положительного влияния на увеличение скорости конвекции фосфогипса. Наиболее благоприятным условием является 5% избыток аммиака, уменьшение избытка аммиака приводит к снижению показателей конверсии.

Процесс сжигания раствора сульфата аммония и карбоната кальция из фосфогипса с использованием насыщенного раствора карбоната аммония методом газовой конверсии включает следующие основные стадии:

1. Карбонизация циркулирующего раствора, содержащего 25% сульфата аммония, при охлаждении (20-22°С) он всегда насыщается аммиаком и углекислым газом, образуя карбонат аммония;



2. Конверсия: Полученный насыщенный раствор карбоната и сульфата аммония смешивают с фосфогипсом и нагревают до температуры 53-57 °С.



Для повышения скорости конверсии в гипсовую пульпу подают небольшие количества газообразного аммиака и углекислого газа.

Количество газа рассчитывается следующим образом: количество аммиака в пульпе должно быть на 10–15% больше стехиометрического. В лабораторных условиях насыщение циркулирующего раствора газообразным аммиаком происходит в течение 15–20 минут, а карбонизация — в течение 60 минут.

Реакцию проводили в течение 4,0–8,0 часов. Концентрация сульфата аммония в конечном продукте определяется его количеством в исходном растворе.

С целью определения возможности разделения суспензии конверсионного фосфогеля методом фильтрования под давлением проведены испытания жидкой конверсии фосфогипса в лабораторных условиях (степень конверсии – 98,7%). Более удобным методом переработки фосфогипса является жидкостная конверсия. Отличается высоким выходом сульфата аммония и карбоната кальция (фосфомела) и высоким качеством получаемых продуктов.

Как показали исследования по переработке фосфогипса, наиболее слабым местом технологии является низкая скорость фильтрации фосфогипса под вакуумом. Для разделения суспензии конверсионного фосфомела использовался лабораторный напорный фильтр. Эксперимент по напорной фильтрации суспензии конверсионного фосфомела проводился в следующем порядке. В воронку фильтра наливали определенный объем свежеприготовленной суспензии конверсионного фосфомела. В качестве фильтровальной ткани использовалась бельтинговая ткань.

Эта ткань используется в производстве и для фильтрации под давлением. После закрытия сопла для предотвращения выхода воздуха подавали сжатый воздух под давлением 7 атм. Когда появились

первые капли фильтрата, они включили секундомер и засекли время. После завершения фильтрации промывную воду сливали в колодец. В качестве промывочной воды использовалась питьевая вода температурой 560°C. Количество воды приводилось по отношению к массе сухого осадка. Время стирки также фиксировалось с помощью секундомера.

После промывки влажный шлам визуально представляет собой плотный осадок, который податлив к механическому воздействию и легко удаляется с фильтровальной ткани. По результатам лабораторных экспериментов установлено, что при фильтрации конверсионного фосфомела под давлением эффективность его разделения увеличивается в 5–6 раз по сравнению с вакуумной фильтрацией.

Процесс дегидратации материала изучался в нагревательном аппарате типа вращающейся печи в различных лабораторных условиях при температурах от 105 до 170°C. Сырье и продукты сгорания анализируются методами химического анализа, а именно: определялись методами лучевой и электронной микроскопии и рентгенофазового анализа.

Установлено, что дегидратация дигидрата сульфата кальция происходит при сжигании фосфогипса в весьма специфических условиях. По мере испарения свободной влаги из ячеек кристаллов гипса образуется концентрированный фосфатный раствор, насыщенный ионами H_2SF_6 другой кислоты. Концентрированная температура кипения фосфорной кислоты составляет 47% P-05 при 135°C; при 150°C образуется 100% P_2O_5 . Концентрированный раствор кислоты активизирует дегидратацию гипса, а также изменяет условия выделения кристаллизационной воды, влияя на процесс минералообразования. Это влияет на технические характеристики приобретаемого связующего вещества.

Кинетика изменения температуры гипса в изотермических условиях определяется интенсивностью эндотермического процесса испарения гигроскопической влаги.

Добавление определенного количества нейтрализующих добавок к активным кислотным соединениям, рассчитанного на связывание заданного уровня фосфогипса перед обжигом, последовательно сокращает время схватывания вяжущего. Поэтому правильно определенное значение кислотности фосфогипса позволяет правильно подобрать количество и способ введения нейтрализующих добавок, регулировать pH среды при горении, управлять физико-химическими процессами минерализации и получать фосфогипсовое вяжущее с требуемыми свойствами.

Таким образом, при соответствующем методе можно будет получить строительный гипс 1-го класса, отвечающий высоким требованиям качества, из вяжущего, требующего большого количества воды и имеющего плохие свойства.

Одной из основных проблем является нейтрализация летучих фтористых соединений, выделяющихся при сушке и сжигании непромытого фосфогипса. По данным исследований, концентрированный раствор кислого фосфата при сжигании активно разлагается на нерастворимые соединения фтора. Поэтому при производстве кислотосвязывающих веществ целесообразно использовать адсорбционное устройство, чтобы избежать выброса вредных веществ в атмосферу. На его основе (концентрация — 10–12%) можно получать плавиковую кремниевую кислоту, являющуюся сырьем для производства фтористых солей.

Лабораторные исследования показали, что при переработке фосфогипса и достаточной нейтрализации известью происходит 100% связывание фтора, а свойства вяжущего, соответствуют нормативу.

Таким образом, при выборе технологического норматива производства возможно получение строительного гипса 1 марки с высокими техническими показателями, учитывая влияние кислых добавок фосфогипса на механизм кинетики его дегидратации.

Список литературы

1. Gurbanguly Berdimuhamedow. Türkmenistanyň durmuş-ykdysady ösüşiniň döwlet kadalaşdyrylyşy. / G. Berdimuhamedow – Aşgabat: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2010. – 238 s.
2. Gurbanguly Berdimuhamedow. Bilim-bagtyýarlyk, ruhubelentlik, rowaçlyk. / G. Berdimuhamedow – Aşgabat, Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2014. – 286 s.
3. Türkmen diliniň orfografik sözlügi. / Gurbanguly Berdimuhamedowyň umumy redaksiýasy bilen. – Aşgabat, Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2016. – 62 s.
4. Исследование возможности использования фосфогипса на Балаклеяском цементно – шиферном комбинате, Отчет о НИР № 530, «Южги-процемент». – Харьков, 1975. – 124 с.
5. Эрайзер Л.Н. Разработка способа переработки фосфогипса в полезные продукты. / Эрайзер Л.Н., Горнев В.А., Косс Т.В. – М.: ФиС, 2012. – 238 с.

УДК 628 С247

Минаков Ф.М., Соломатин А.Е., Захаров С.Л.

Проектная разработка, изготовление и испытание аппарата очистки с нагревательным элементом.

Минаков Фёдор Максимович – студент; fedaminakov@gmail.com

Соломатин Алексей Евгеньевич – студент; ssgo4020@gmail.com

Захаров Станислав Леонидович – д.т.н., доц., проф. Каф. Инженерного проектирования технологического оборудования; staszaharov@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева», Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В работе рассмотрен вариант проектирования в 3D высоконапорного аппарата очистки с нагревательным элементом в системе Компас с целью дальнейшего проектирования в системе Solidworks Flow simulation для выявления температурно-гидродинамических застойных зон.

Ключевые слова: система компас, проектирование 3D, аппарат очистки с нагревательным элементом

Design, manufacture and testing of a cleaning process with a heating element.

Minakov F.M., Solomatin A.E., Zakharov S.L.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation.

The paper considers a variant of designing in 3D a high-pressure cleaning apparatus with a heating element in the Compass system for the purpose of further design in the Solidworks Flow simulation system to identify temperature-hydrodynamic stagnant zones.

Keywords: Compass system, 3D design, cleaning apparatus with heating element

Введение

Исследования, проведенные в начале 1970-х годов в рамках деятельности специализированной лаборатории, позволили разработать и провести предварительные испытания лабораторных и опытно-промышленных установок баромембранного разделения. Анализ полученных результатов выявил необходимость проведения проектно-конструкторских работ, направленных на создание аппаратов с увеличенной площадью межфазного контакта и применением мембран нового поколения. Выявленная потребность в разработке универсальных бескорпусных аппаратов, а также аппаратуры с усовершенствованными герметизирующими узлами, обусловлена несоответствием существующих разъемных соединений техническим требованиям, предъявляемым к современным мембранным системам. Несмотря на то, что фундаментальные принципы, заложенные в исследованиях лаборатории, нашли применение в последующих разработках, ряд ключевых проблем остался нерешенным. Целью настоящей работы является устранение принципиальных ограничений, препятствующих эффективному применению мембранных методов разделения, а также модернизация разъемных соединений до уровня современных мировых стандартов с учетом передовых конструкторских решений.

Проектирование высоконапорных аппаратов для баромембранных процессов предполагает использование специализированного программного обеспечения, обладающего высоким уровнем точности расчетов и возможностями моделирования поведения конструкции в условиях экстремальных давлений, что является критическим фактором для обеспечения безопасности и надежности проектируемого оборудования. В рамках данного исследования в качестве инструментария для автоматизированного проектирования (САПР) была выбрана система "Компас-3D". Выбор обусловлен такими факторами, как доступность данного программного продукта для обучающихся различных уровней, эргономичность пользовательского интерфейса и наличие обширного набора инструментов для трехмерного моделирования, позволяющих создавать виртуальные прототипы высокой степени детализации.

Одним из значительных преимуществ "Компас-3D" является поддержка параметрического моделирования, что существенно упрощает процесс внесения изменений в конструкцию и анализа различных вариантов исполнения аппарата. Кроме того, важным аспектом выбора данной системы стала возможность ее интеграции с другими программными комплексами, в частности, с системой конечно-элементного анализа SolidWorks Flow Simulation. В рамках дальнейших исследований планируется проведение численного моделирования с использованием SolidWorks Flow Simulation для определения температурно-гидродинамических характеристик проектируемого

аппарата. Особое внимание будет уделено выявлению потенциальных застойных зон, которые могут негативно повлиять на работоспособность и долговечность конструкции. Такой комплексный подход к проектированию позволит получить всестороннюю оценку характеристик высоконапорного аппарата и оптимизировать его конструкцию с учетом всех эксплуатационных факторов.

Экспериментальная часть

При конструировании аппарата в трехмерной среде системы Компас осуществляется выборка стандартных элементов из встроенной библиотеки: фланцы, шпильки, гайки, шайбы. Совмещение отверстий элементов, таких как пористые трубки, прокладки и специальные пластины, выполняется с использованием специального штифта. Остальные детали проектируются в соответствии с правилами и стандартами проектирования, принятыми в системе Компас (см. Рис. 1).

Ключевыми элементами спроектированного аппарата являются полупроницаемые пористые поверхности, выполненные в виде трубок из пористого титана. Эти трубки объединяются в рабочий элемент, который может состоять из одной или нескольких десятков пористых трубок. Герметизация торцов пористых трубок обеспечивает необходимую изоляцию. Спроектированные фланцы, между которыми размещается рабочий элемент, стягиваются с помощью шпилек. Для обеспечения герметичности может быть использована прокладка типа «Тор-кольцо», которая устанавливается между трубками и фланцами (см. Рис. 2).

Спроектированный аппарат позволяет существенно увеличить производительность за счет повышения температуры рабочей среды. Это стало возможным благодаря выявлению впервые в практике отечественного обратного осмоса температурного эффекта [4], который открывает новые перспективы для оптимизации процессов разделения и фильтрации. Температурный эффект — это явление, при котором повышение температуры исходного раствора приводит к увеличению проницаемости полупроницаемых мембран, что, в свою очередь, повышает производительность аппарата. В связи с выявлением температурного эффекта были сконструированы аппараты, в которых производительность увеличивали за счет нагревания исходных растворов, продавливаемых через полупроницаемые поверхности различных геометрических форм. Наш аппарат снабжен нагревательным элементом, который вводится в его центр.

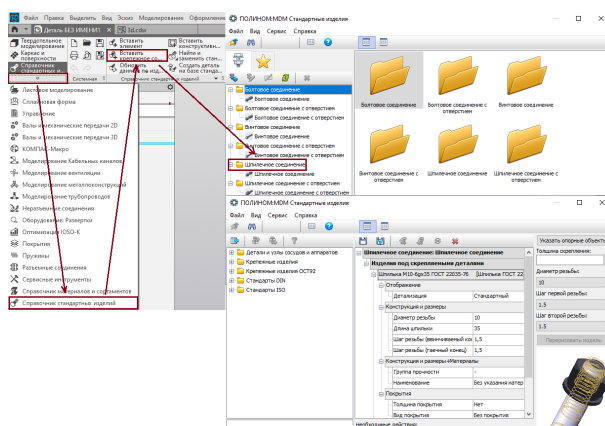


Рисунок 1 - Выбор крепежного изделия из справочника стандартных изделий

Для выбора в трехмерной среде системы компас стандартных элементов из встроенных библиотек, соответствующие международным стандартам, требуется нажать на стрелочку вниз на верхней панели для раскрытия выпадающего списка с разными наборами функция для разных целей, выполняемых при моделировании. Нам необходимо выбрать «Справочник стандартных изделий». Верхняя панель изменится на соответствующую панель для работы со стандартными библиотеками элементов. Далее нажимаем «вставить крепежное соединение», открывается диалоговое окно позволяющее выбрать какой крепежный элемент нам необходимо вставить. В данной сборочной единице использовалось шпильчатое соединение.

Шпилька представляет собой крепежное изделие в виде цилиндрического стержня с резьбой на обоих концах. Та часть шпильки, которая ввинчивается, называется посадочным концом, а часть, на которую надеваются присоединяемые детали (шайба и гайка), называется стяжным концом. Шпильки специального назначения практикуют там, где на соединения действуют высокие нагрузки. Данный вид крепежа находит применение в промышленности и строительстве.

Шпильчные соединения требуются в тех случаях, когда в конструкции нет места или нецелесообразно сверлить глубокие отверстия для размещения головок болтов. Также шпильчное соединение облегчает вес конструкции.

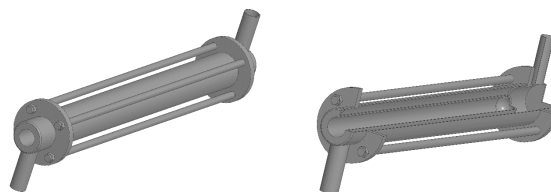


Рисунок 2 - Аппарат очистки с нагревательным элементом в исполнении 3D системе Компас

На рисунке 2 продемонстрировано изображение 3D трубы, в которой помещаются греющие элементы. Сама труба приваривается к фланцу с входным патрубком, который приваривается к элементу цилиндрической формы. Спроектированная сборочная единица вставляется в пористую трубу из титана. Исходный раствор подается через приварные цапки, либо с помощью сварки труб к конической формы выступам на фланцах.

Визуализация внутренних компонентов аппарата достигнута посредством представления четверти-сечения трехмерной модели, созданной в системе "Компас-3D" (рис. 3). Использование методов компьютерного моделирования позволило оптимизировать процесс разработки, существенно сократив временные и материальные затраты на изготовление прототипов, а также минимизировать вероятность возникновения ошибок на этапе проектирования.

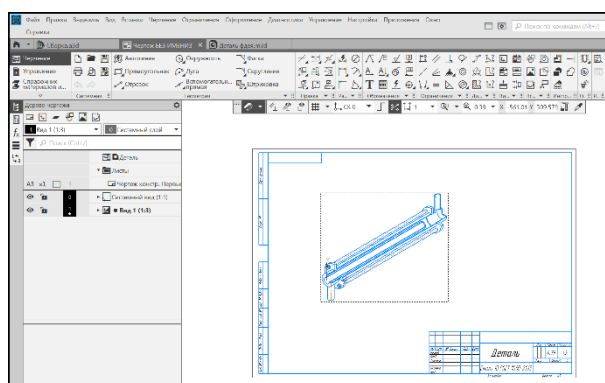


Рисунок 3 - Ассоциативный чертёж аппарата, разработанный в системе Компас 3D с разрезом $\frac{1}{4}$

Трехмерная модель аппарата позволила провести комплексный анализ его конструкции в сборе, детально изучить пространственное расположение и взаимодействие компонентов. Сечение модели (рис. 3) демонстрирует внутреннюю архитектуру устройства, включая цилиндрические трубки, являющиеся основными функциональными элементами, и способ их соединения с промежуточными дисками (фланцами). Герметизация соединений достигается применением прокладок, предотвращающих утечки рабочей среды и обеспечивающих поддержание заданных параметров давления. Выбор материала и типа прокладок обусловлен условиями эксплуатации, такими как рабочая температура, давление и химический состав среды. Трехмерное моделирование, помимо визуализации, позволяет проводить виртуальные испытания на герметичность при различных условиях эксплуатации, оценивая эффективность уплотнительных решений, что способствует оптимизации конструкции и повышению ее надежности и безопасности.

Для обеспечения требуемой прочности и надежности соединений при высоких нагрузках шпильки подвергались закалке. Данный вид термической обработки не применим к болтам вследствие повышенного риска их разрушения. Наглядная и информативная трехмерная модель (рис. 2) послужила основой для автоматической генерации ассоциативного чертежа, что существенно упрощает процесс документирования и подготовки производства. Применение ассоциативных чертежей гарантирует соответствие между трехмерной моделью и двумерной документацией, минимизируя вероятность ошибок и повышая эффективность проектирования.

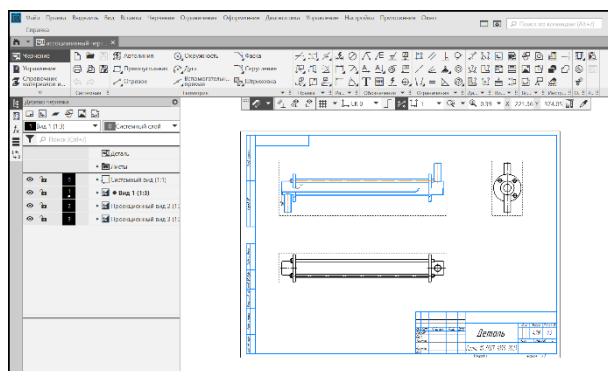


Рисунок 4 - Чертеж аппарата очистки с нагревательным элементом выполненный ассоциативно

Рис. 4 представляет детальное изображение аппарата очистки с нагревательным элементом в формате 2D-сборки, созданной на основе разработанных чертежей. Испытания подтвердили высокую эффективность аппарата, несмотря на нестандартную конструкцию торцевого уплотнения. Выбор этой конфигурации позволил уменьшить металлоемкость и габариты аппарата без потери герметичности, что актуально для современного аппаратостроения. Аппарат также продемонстрировал стабильную работу с органическими средами. Результаты испытаний обосновывают применение выбранного решения для торцевого уплотнения.

Заключение

Спроектированный аппарат (Рис. 4) с использованием температурного эффекта демонстрирует значительное увеличение производительности за счет оптимизации конструкции и применения современных материалов. Использование системы Компас для проектирования позволило создать универсальные и эффективные решения, которые могут быть интегрированы в промышленные процессы. Также аппарат может быть включен в схему подачи исходного раствора с перекрестным током, противотоком раствора и др. по варианту фильтрации и диафильтрации. Дальнейшие исследования будут направлены на совершенствование герметичных соединений и повышение устойчивости аппаратов к высоким температурам и давлениям.

Список литературы

1. Дытнерский Ю.И., Борисов Г.С. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию. 2-е издание, перераб. и доп. М.: Химия, 1991. -493 с.
2. Каграманов Г. Г., Фаткуллин З.З., Шитова В. О., Фарносова Е. Н. Разработка мембранной технологии очистки шахтных вод // Успехи в химии и хим. технологии: Сб. науч. тр. /РХТУ им. Д.И. Менделеева. — Т. 29 из 2. — М.:РХТУ им. Д.И. Менделеева Москва, 2015. — С. 110–112.
3. Свитцов А. А., Кручинина Н. Е. Чем хороши и кому доступны наилучшие доступные технологии // Экология и промышленность России. — 2018. — Т. 22, № 3. — С. 60–63
4. Захаров С. Л., Савков И. М. Восстановление работоспособности современных трубчатых мембранных фильтрующих элементов из полисульфона и полиэфирсульфона // Ремонт, восстановление, модернизация. — 217. — № 1/2017.

УДК 536.2.02

Минченков Н.Д., Чуракова С.К.

Дифференциальное уравнение теплопроводности и конвективного теплообмена в цилиндрических координатах и его практические приложения

Минченков Никита Денисович – магистрант, nminch02@mail.ru

Чуракова Светлана Константиновна – научный руководитель, д.т.н., профессор кафедры НХТ.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,

Россия, Уфа, 450064, ул. Космонавтов, 1.

В тезисах рассматривается вывод дифференциального уравнения теплопроводности и конвективного теплообмена в цилиндрической системе координат из модели элементарного цилиндрического объема в наиболее общем виде для трехмерного температурного поля и показывается тождественность уравнений в разных системах координат. Также демонстрируется вывод уравнения сплошности и неразрывности потока несжимаемой жидкости в цилиндрических координатах. Из полученного дифференциального уравнения находятся интегральные уравнения теплопроводности для трех видов одномерных температурных полей, приводится пример одномерного углового температурного поля.

Ключевые слова: уравнение теплопроводности, температурное поле, уравнение неразрывности, цилиндрические координаты.

Differential equation of thermal conductivity and convective heat transfer in cylindrical coordinates and its practical applications

Minchenkov N.D., Churakova S.K.

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation.

The theses consider the derivation of the differential equation of thermal conductivity and convective heat transfer in a cylindrical coordinate system from the model of an elementary cylindrical volume in the most general form for a three-dimensional temperature field and show the identity of the equations in different coordinate systems. The derivation of the equation of continuity and continuity of the incompressible fluid flow in cylindrical coordinates is also demonstrated. From the obtained differential equation, integral equations of thermal conductivity are found for three types of one-dimensional temperature fields, and an example of a one-dimensional angular temperature field is given.

Keywords: equation of thermal conductivity, temperature field, continuity equation, cylindrical coordinates.

Введение

Процессы распространения тепла имеют большое значение во всех областях техники и технологии, и их адекватное описание является важной теоретической и практической задачей. Теплопередача посредством теплопроводности в неподвижной среде описывается основным дифференциальным уравнением теплопроводности, которое в наиболее общем виде выглядит так [1]:

$$\frac{\partial(\rho c t)}{\partial \tau} = \frac{\partial \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right)}{\partial z} + F, \quad (1)$$

где $F=F(x,y,z)$ – плотность тепловых источников.

При $\lambda, \rho, c = \text{const}$ данное уравнение переходит в [2]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t, \quad (2)$$

Здесь $a = \lambda / (\rho c)$ – коэффициент температуропроводности.

Данное уравнение является универсальным в фундаментальном смысле, поскольку может быть получено не только в скалярной форме при выделении элементарного объема в виде прямоугольного параллелепипеда, но и векторной, при выделении объема произвольной формы. Однако аналитическое решение из него возможно получить только для одномерного температурного поля. Таким способом удастся получить уравнение теплопроводности плоской стенки в интегральной форме, но невозможно получить уравнение теплопроводности цилиндрической стенки, так как в декартовых координатах температурное поле не является одномерным даже при допущении, что температура меняется только по толщине стеки. Для нахождения распределения температур по

толщине цилиндрической стенки [3] в уравнение Фурье подставляется количество теплоты, переданное за определенный промежуток времени, и площадь цилиндра произвольного радиуса r :

$$Q = -\lambda 2\pi r L \tau \frac{dt}{dr}, \quad (3)$$

Интегрирование данного уравнения дает логарифмический закон изменения температуры по толщине цилиндрической стенки при установившемся процессе теплообмена. Однако описанный подход имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что для нахождения интегральной формы уравнения теплопроводности цилиндрической стенки использовалось не основное дифференциальное уравнение теплопроводности, а уравнение Фурье, в котором, к тому же, фигурируют конечные величины количества теплоты, поверхности и времени теплопередачи. Это означает, во-первых, что описанный подход является частным случаем решения задачи о теплопроводности цилиндрической стенки и применим лишь к одномерным осесимметричным температурным полям, а, во-вторых, для практического использования данного уравнения необходимо располагать информацией о количестве теплоты, переходящей через стенку за определенное время, что усложняет задачу.

В связи с широкой распространенностью цилиндрических тел как в химической технологии, так и в других областях техники, а также возможностью существования не осесимметричных температурных полей в цилиндрических телах представляет интерес получения основного дифференциального уравнения теплопроводности и конвективного теплообмена в цилиндрической системе координат.

Методология исследования и обсуждение результатов

Для получения основного дифференциального уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах была использована модель элементарного цилиндрического объема (рис. 1).

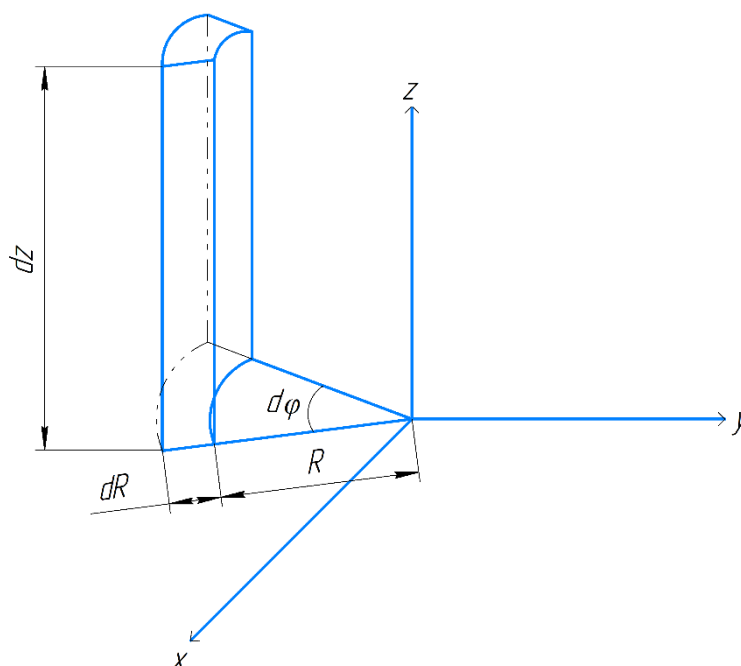


Рисунок 1 - Элементарный цилиндрический объем.

Выделим входящие в элементарный объем и выходящие из него тепловые потоки по каждому из трех направлений: радиальному, вертикальному и угловому, и найдем их разности из уравнения Фурье. При этом необходимо учитывать, что поверхности, через которые тепловые потоки входят в элементарный объем и выходят из него в радиальном направлении не равны, а выражение градиента по угловому направлению имеет вид $\frac{1}{R} \frac{\partial t}{\partial \varphi}$. Пренебрегая бесконечно малыми более высокого порядка, можем получить сумму изменения тепловых потоков по всем трем направлениям:

$$\sum dQ = dQ_z + dQ_\varphi + dQ_R = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} R dR dz d\varphi d\tau + \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial R^2} R dR d\varphi dz d\tau + \frac{\lambda}{R} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} d\varphi dR dz d\tau + \lambda dt d\varphi dz d\tau, (4)$$

Приращение количества теплоты в элементарном объеме за время dt выражается в изменении температуры на величину dt :

$$dQ = \rho c R dR dz d\varphi \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau$$

Приравнявая это к суммарному приращению тепловых потоков и сокращая множители, получаем основное дифференциальное уравнение теплопроводности неподвижной среды в цилиндрических координатах, связывающее временное и конвективное приращение температуры:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a * \left[\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{1}{R^2} * \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial R^2} + \frac{1}{R} * \frac{\partial t}{\partial R} \right], (5)$$

Для стационарного процесса теплопередачи оно переходит в

$$\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{1}{R^2} * \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial R^2} + \frac{1}{R} * \frac{\partial t}{\partial R} = 0, (6)$$

что является уравнением Лапласа в цилиндрических координатах [4], что совпадает со стационарным вариантом уравнения (2). Полученный результат демонстрирует инвариантность уравнений, описывающих одни и те же физические процессы, и независимость полученного результата от выбранной системы координат.

Уравнение (6), в отличие от дифференциального уравнения теплопроводности в декартовых координатах, позволяет путем интегрирования получить уравнение теплопроводности цилиндрической стенки, так как в цилиндрических координатах осесимметричное температурное поле, в котором температура меняется только по толщине, является одномерным. Переходя к полным дифференциалам, получаем:

$$\frac{dt}{dR} = -R \frac{d^2 t}{dR^2}$$

Решением данного дифференциального уравнения будет выражение:

$$t = C_1 \ln R + C_2, (7)$$

Стоит отметить, что основное дифференциальное уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах позволяет найти распределение температур в плоской стенке при стационарном режиме теплообмена. Для этого нужно рассмотреть случай, когда направление температурного градиента параллельно оси z (ось перпендикулярна плоскости стенки). Интегрируя уравнение (6), получаем

$$t = C_1 z + C_2, (8)$$

то есть то же самое уравнение теплопроводности плоской стенки, которое следует из дифференциального уравнения в декартовых координатах.

Во многих источниках описывается применение цилиндрической системы координат для частных случаев решения задач о распределении температур в цилиндрических телах, однако во многих из них рассматриваются только одномерные радиальные или двумерные (осесимметричные, по радиальному и линейному направлениям) поля [5, 6, 7] в силу распространенности таких процессов. Однако в некоторых случаях наблюдается также зависимость температуры от угловой координаты. Примером могут служить цилиндрические трубопроводы с греющими кабелями [8]. В самом простом случае один греющий кабель проложен вдоль стенки трубы соосно (рис.2) [9]:

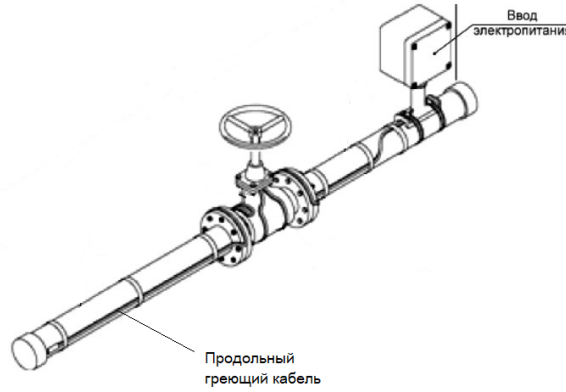


Рисунок 2 - Трубопровод с соосным греющим кабелем

В этом случае интегрирование уравнения (6) по угловой производной дает такую форму интегрального уравнения теплопроводности для случая, когда температура зависит только от угла:

$$t = C_1\varphi + C_2, \quad (9)$$

Линейное убывание температуры наблюдается на отрезке $[0;\pi]$ в обоих направлениях от источника тепла.

Таким образом была рассмотрена теплопроводность неподвижной среды. Однако, как в технологической практике, так и в нефтегазодобыче [10] часто необходимо знать распределение температур в движущемся цилиндрическом потоке газа или жидкости. В связи с этим перевод уравнения конвективного теплообмена в цилиндрические координаты также уместен [11].

Рассматривая представленную на рис.1 модель элементарного цилиндрического объема, получаем дифференциальное уравнение конвективного теплообмена:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a * \left[\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{1}{R^2} * \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial R^2} + \frac{1}{R} * \frac{dt}{dR} \right] - \left[\frac{\partial(w_z t)}{\partial z} + \frac{\partial(w_R t)}{\partial R} + \frac{1}{R} * \frac{\partial(w_\varphi t)}{\partial \varphi} + \frac{w_R t}{R} \right], \quad (10)$$

Массы жидкости, входящей в элементарный объем по направлению R за время $d\tau$, и выходящей из него с противоположной стороны, с учетом изменения сечения потока, равны соответственно:

$$M_R = \rho w_R R d\varphi dz d\tau$$

$$M_{R+dR} = \left(\rho w_R + \frac{\partial(\rho w_R)}{\partial R} dR \right) (R + dR) d\varphi dz d\tau$$

Приращение массы жидкости по направлению R составит

$$dM_R = M_R - M_{R+dR} = -\rho w_R dR d\varphi dz d\tau - \frac{\partial(\rho w_R)}{\partial R} R dR d\varphi dz d\tau - \frac{\partial(\rho w_R)}{\partial R} (dR)^2 d\varphi dz d\tau$$

$$\approx -\rho w_R dR d\varphi dz d\tau - \frac{\partial(\rho w_R)}{\partial R} R dR d\varphi dz d\tau$$

поскольку слагаемое $-\frac{\partial(\rho w_R)}{\partial R} (dR)^2 d\varphi dz d\tau$ является бесконечно малым высшего порядка.

Аналогично находим приращения массы по направлениям z и φ :

$$dM_z = -\frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z} R dR dz d\varphi d\tau$$

$$dM_\varphi = -\frac{\partial(\rho w_\varphi)}{\partial \varphi} R dR d\varphi dz d\tau$$

Суммируя приращения по направлениям и приравнявая это к приращению массы элементарного объема за счет изменения плотности, получаем:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = - \left[\frac{1}{R} * \frac{\partial(\rho w_\varphi)}{\partial \varphi} + \frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z} + \frac{\rho w_R}{R} + \frac{\partial(\rho w_R)}{\partial R} \right]$$

Для стационарного потока несжимаемой жидкости ($\rho = \text{const}$), получаем:

$$\frac{1}{R} * \frac{\partial w_{\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial w_z}{\partial z} + \frac{\partial w_R}{\partial R} + \frac{w_R}{R} = 0, \quad (11)$$

Данное уравнение является уравнением сплошности и неразрывности потока несжимаемой жидкости и представляет собой дивергенцию вектора скорости в цилиндрических координатах [12], аналогично выражению

$$\operatorname{div} w = \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0$$

являющемуся уравнением сплошности и неразрывности потока несжимаемой жидкости в декартовых координатах.

Раскрывая производные во втором слагаемом уравнения (10), получаем:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(w_z t)}{\partial z} + \frac{\partial(w_R t)}{\partial R} + \frac{1}{R} * \frac{\partial(w_{\varphi} t)}{\partial \varphi} + \frac{w_R t}{R} \\ = t \left(\frac{1}{R} * \frac{\partial w_{\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial w_z}{\partial z} + \frac{\partial w_R}{\partial R} + \frac{w_R}{R} \right) + \frac{1}{R} * w_{\varphi} \frac{\partial t}{\partial \varphi} + w_z \frac{\partial t}{\partial z} + w_R \frac{\partial t}{\partial R} \end{aligned}$$

Тогда с учетом (11) для неразрывного потока несжимаемой жидкости дифференциальное уравнение конвективного теплообмена (10) сводится к виду:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a * \left[\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{1}{R^2} * \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial R^2} + \frac{1}{R} * \frac{dt}{dR} \right] - \left[\frac{1}{R} * w_{\varphi} \frac{\partial t}{\partial \varphi} + w_z \frac{\partial t}{\partial z} + w_R \frac{\partial t}{\partial R} \right], \quad (12)$$

Заключение

Таким образом, в представленных тезисах была описана модель элементарного цилиндрического объема и получено основное дифференциальное уравнение теплопроводности неподвижной среды в цилиндрических координатах. Широкая распространенность цилиндрических тел в технологической практике и одновременная невозможность аналитического интегрирования дифференциального уравнения теплопроводности в декартовых координатах для осесимметричного температурного поля подчеркивают целесообразность применения цилиндрической системы координат для описания процессов теплопроводности. В работе демонстрируется равносильность уравнений теплопроводности в различных системах координат и приводится вывод интегральной формы уравнения теплопроводности плоской стенки из дифференциального уравнения в цилиндрических координатах, в то время как для цилиндрической стенки найти распределение температур из уравнения в декартовых координатах невозможно, так как данное температурное поле не является одномерным в данной системе координат. Также в работе демонстрируется пример и получается уравнение для одномерного углового температурного поля, что на практике наблюдается в трубопроводах с греющими кабелями. При этом в литературе в основном приводятся уравнения для осесимметричных полей.

Также в технологической практике распространены осесимметричные потоки, что указывает на уместность приложения цилиндрической системы координат для получения уравнения конвективной теплопроводности. Для получения данного уравнения для потока несжимаемой жидкости был продемонстрирован вывод уравнения неразрывности потока в цилиндрических координатах с помощью предложенной модели элементарного объема, которое также выражается дивергенцией вектора скорости. В результате получен наиболее общий вид дифференциального уравнения теплопроводности и конвективного теплообмена в цилиндрической системе координат, которое может использоваться для аналитического нахождения распределения температур в одномерных в данной системе координат температурных полях. Также использование данного уравнения облегчает решение задач теплопроводности численными методами, так как в некоторых случаях температурные поля, являющиеся трехмерными в декартовых координатах, окажутся двумерными в цилиндрических координатах.

Результаты проведенного исследования опубликованы в статьях:

1. Минченков, Н. Д. Дифференциальное уравнение теплопроводности и конвективного теплообмена в цилиндрической системе координат / Н. Д. Минченков, С. К. Чуракова // Башкирский химический журнал. – 2024. – Т. 31, № 1. – С. 96-100. – DOI 10.17122/bcj-2024-1-96-100.

2. Minchenkov, N.D., Churakova, S.K. Differential Equation of Thermal Conductivity and Convective Heat Transfer in a Cylindrical Coordinate System. Theor Found Chem Eng 58, 504–508 (2024). <https://doi.org/10.1134/S0040579524600906>

Список литературы

1. Физический энциклопедический словарь. / Гл. ред. А.М. Прохоров. Ред. кол. Д.М. Алексеев, А.М. Бонч-Бруевич, А.С. Боровик-Романов и др. – М.: Сов. энциклопедия, 1984. – 944 с., ил., 2 л. цв. ил.
2. Вейник А.И. Приближенный расчет процессов теплопроводности. – М.: Рипол Классик, 2013. – 190 с.
3. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. – 10-е издание, стереотипное, доработанное. Перепеч. с изд. 1973 г. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. – 753 с.
4. Спивак-Лавров, И. Ф. Решения уравнения Лапласа в цилиндрических координатах, приводимые к двумерным гармоническим потенциалам / И. Ф. Спивак-Лавров, С. У. Шарипов, Т. Ж. Шугаева // Научное приборостроение. – 2020. – Т. 30, № 2. – С. 51-60. – DOI 10.18358/np-30-2-i5160.
5. Чермошенцева, А. А. Течение теплоносителя в геотермальной скважине / А. А. Чермошенцева // Математическое моделирование. – 2006. – Т. 18, № 4. – С. 61-76.
6. Горбунов В. А. и др. Разработка модели по определению температурного поля твэла в двумерной постановке задачи //Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2019. – №. 2. – С. 174-184.
7. Двумерная задача нестационарной теплопроводности в многослойных пластине и цилиндре / В. А. Левченко, М. В. Кашеев, С. Л. Дорохович, А. А. Зайцев // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2020. – № 2. – С. 141-149. – DOI 10.55176/2414-1038-2020-2-141-149.
8. Крапивский Евгений Исаакович, Вишняков Иван Александрович Об особенностях эксплуатации трубопровода, оснащенного системой электроподогрева // ГИАБ. 2012. №7.
9. ГОСТ ИЕС 62395-1-2016 Системы обогрева трубопроводов, работающие на электрическом сопротивлении, для промышленного и коммерческого применения. Часть 1. Общие требования и требования к испытаниям
10. Филиппов А. И., Ахметова О. В., Рогов В. А. Математическое моделирование температурного поля цилиндрического потока смеси жидкостей //Вестник Херсонского национального технического университета. – 2011. – №. 3 (42). – С. 456-460.
11. Моисеева Л. А., Черкасов С. Г. Стационарный свободно-конвективный теплообмен в цилиндрической емкости при равномерном теплоподводе и одновременном отводе тепла через локальные стоки //Теплофизика высоких температур. – 1997. – Т. 35. – №. 4. – С. 564-569.
12. Бахвалов П. А., Козубская Т. К. Рёберно-ориентированная аппроксимация уравнений Навье–Стокса для осесимметрических течений на неструктурированной сетке //Препринты Института прикладной математики им. МВ Келдыша РАН. – 2017. – №. 0. – С. 144-24.
13. Минченков, Н. Д. Дифференциальное уравнение теплопроводности и конвективного теплообмена в цилиндрической системе координат / Н. Д. Минченков, С. К. Чуракова // Башкирский химический журнал. – 2024. – Т. 31, № 1. – С. 96-100. – DOI 10.17122/bcj-2024-1-96-100.
14. Minchenkov, N.D., Churakova, S.K. Differential Equation of Thermal Conductivity and Convective Heat Transfer in a Cylindrical Coordinate System. Theor Found Chem Eng 58, 504–508 (2024). <https://doi.org/10.1134/S0040579524600906>

Морозов М.Д., Матвеева О.А.

Совершенствование процессов подготовки газа на заводах СПГ

Морозов Максим Дмитриевич – студент (магистрант); maks.0.maks88@gmail.com.

Матвеева Оксана Александровна – к.т.н., доцент кафедры;

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина,

Россия, Москва, 119991, Ленинский проспект, дом 65.

Современные технологии производства сжиженного природного газа (СПГ) требуют применения высокоэффективных решений для очистки газа от механических примесей и капельной жидкости. Одним из ключевых элементов таких систем являются фильтры-коалесцеры, играющие важную роль в повышении надежности и эффективности технологического процесса. В данной работе проведен анализ существующих методов очистки газа, выявлены их преимущества и недостатки. Ключевые слова: Сжиженный природный газ, фильтр-коалесцер, очистка газа, механические примеси, капельная жидкость, модернизация.

Improvement of gas preparation processes at LNG plants

Morozov M.D.¹, Matveeva O.A.¹.

¹ Gubkin University of Oil and Gas (NIU)

Modern liquefied natural gas (LNG) production technologies require highly efficient solutions for gas purification from mechanical impurities and liquid droplets. One of the key elements of such systems is filter-coalescers, which play a crucial role in improving the reliability and efficiency of the technological process. This study analyzes existing gas purification methods, identifies their advantages and disadvantage.

Key words: Liquefied natural gas, filter-coalescer, gas purification, mechanical impurities, liquid droplets, modernization.

Основная часть

Процесс подготовки газа для сжижения и транспортировки на заводах СПГ играет ключевую роль в эффективности всего производства. Газ, поступающий на завод, часто содержит механические примеси, влагу, а также другие загрязняющие вещества, которые могут серьезно повлиять на качество конечного продукта и на надежность работы оборудования. Для того чтобы исключить такие риски, используются различные системы очистки газа, среди которых фильтры-коалесцеры занимают центральное место. [1]

Фильтры-коалесцеры выполняют двойную функцию: фильтрацию твердых частиц и коалесценцию (сбор капель жидкости). Эти устройства обеспечивают необходимую степень очистки, предотвращают коррозию оборудования и способствуют повышению срока службы компонентов. В условиях увеличивающихся требований к производственным мощностям и экологической безопасности важно постоянно совершенствовать процессы очистки и внедрять инновационные материалы и методы.

Существующие технологии очистки

Очистка газа на СПГ-заводах включает несколько этапов, каждый из которых направлен на удаление определенных загрязнителей. Наиболее важными являются следующие:

1. Удаление механических примесей: это один из первых и ключевых этапов, на котором используются фильтры-коалесцеры. Эти устройства эффективно удаляют твердые частицы, а также капельную жидкость, что критично для стабильности работы оборудования и качества конечного продукта.

2. Удаление влаги: влага в газе может вызвать коррозию, снижая производительность завода и увеличивая затраты на обслуживание. Для ее удаления применяются адсорбционные и абсорбционные методы, а также низкотемпературная сепарация.

3. Удаление кислых компонентов: сероводород и углекислый газ оказывают негативное влияние на качество СПГ и могут привести к коррозии оборудования. Для их удаления используются специальные аминовые очистные установки.

Роль фильтров-коалесцеров

Фильтры-коалесцеры играют важную роль в процессе очистки газа. Эти устройства представляют собой специальные фильтры, которые не только удаляют твердые примеси, но и коалесцируют (объединяют) капли жидкости в более крупные, которые затем удаляются из системы.

Основные преимущества фильтров-коалесцеров включают:

- Высокая степень очистки газа от механических примесей и влаги.
- Продление срока службы оборудования, что достигается за счет предотвращения коррозии и износа.
- Снижение эксплуатационных затрат, поскольку уменьшается частота замены фильтрующих элементов.

Сравнительный анализ фильтрующих материалов

Для оптимизации фильтрации газа на СПГ-заводах необходимо правильно выбрать материалы для фильтров-коалесцеров. В таблице 1 представлен сравнительный анализ различных типов фильтрующих материалов, которые применяются для очистки газа.

Таблица 1

Сравнительный анализ типов фильтрующих материалов для входных фильтров-коалесцеров аминовой очистки газа на заводах СПГ [2,3]

Тип фильтрующего материала	Эффективность очистки (%)	Преимущества	Недостатки
Полиэстер, полипропилен	95%	Очень высокая степень очистки, эффективны для удаления мелких частиц и воды	Высокая стоимость, ограниченная пропускная способность
Полиэфир, нейлон	80-90%	Высокая эффективность очистки от твердых частиц и капель жидкости	Требуется регулярная замена или очистка; не удаляет мелкие загрязнители
Фибра стекла	80-85%	Эффективны при удалении крупных частиц и капель воды	Неэффективны при удалении мелких загрязнителей
Активированный уголь	60-85%	Эффективен для адсорбции органических загрязнителей и сероводорода	Требуется регенерация или замена угольных слоев
Стекловолокно	85-95%	Очень высокая степень очистки, долговечность, устойчивость к химическим воздействиям	Высокая стоимость, может быть жестким и требовать более сложного монтажа

Перспективы развития технологий очистки газа

Современные технологии очистки газа продолжают развиваться, открывая новые горизонты для повышения эффективности работы СПГ-заводов. В числе перспективных направлений можно выделить:

- Использование комбинированных фильтрующих материалов: Сочетание различных материалов в одном фильтре позволяет достигать высокой степени очистки при минимальных эксплуатационных затратах.
- Модернизация конструкции фильтров-коалесцеров: Внедрение новых конструктивных решений, таких как многослойные фильтры, позволяет повысить эффективность очистки и увеличить срок службы оборудования.
- Применение мембранной фильтрации и ультразвуковой очистки: Эти технологии обещают значительные улучшения в эффективности очистки газа, снижая потребность в обслуживании и увеличивая производительность.

- Использование наноматериалов: Нанотехнологии открывают перспективы для создания фильтров с высочайшей степенью очистки и долговечностью, что крайне важно для повышения экологической безопасности процессов. [3]

Дальнейшее развитие технологий очистки газа на СПГ-заводах связано с внедрением новых материалов и методов, которые позволят минимизировать потери газа и улучшить экологическую безопасность процессов. Одним из перспективных направлений является разработка фильтров-коалесцеров с использованием наноматериалов, которые обладают высокой эффективностью очистки и долговечностью.

Кроме того, важным направлением является моделирование и оптимизация процессов очистки газа с использованием современных компьютерных технологий. Это позволит более точно прогнозировать эффективность работы фильтрующих систем и разрабатывать оптимальные решения для конкретных условий эксплуатации.

Качество подготовки газа является одним из ключевых факторов, определяющих эффективность работы СПГ-завода. Недостаточная очистка газа от механических примесей, влаги и кислых компонентов может привести к серьезным последствиям. Например, наличие примесей в газе снижает качество конечного продукта, что делает его менее конкурентоспособным на рынке. Кроме того, загрязнение оборудования ускоряет его износ, что приводит к увеличению затрат на ремонт и замену. В худшем случае, коррозия, вызванная влагой и кислыми компонентами, может стать причиной аварийных ситуаций, что чревато не только финансовыми потерями, но и рисками для безопасности персонала. [2]

Современные технологии подготовки газа должны учитывать не только технические, но и экологические аспекты. Уменьшение выбросов вредных веществ и снижение энергопотребления являются важными задачами для повышения экологической безопасности процессов. Например, эффективные методы очистки газа позволяют минимизировать выбросы углекислого газа и сероводорода, что снижает негативное воздействие на окружающую среду. Кроме того, оптимизация процессов подготовки газа способствует снижению энергопотребления, что не только уменьшает эксплуатационные затраты, но и снижает углеродный след производства. Использование экологически безопасных материалов, таких как перерабатываемые фильтрующие элементы, также вносит вклад в повышение экологической устойчивости процессов.

Современные СПГ-заводы все чаще внедряют системы автоматизации и цифровизации для повышения эффективности процессов подготовки газа. Автоматизированные системы контроля и управления позволяют оптимизировать процессы очистки газа, регулируя параметры работы фильтров-коалесцеров и других элементов очистки в реальном времени. Это не только повышает эффективность, но и снижает влияние человеческого фактора, уменьшая вероятность ошибок. Кроме того, цифровые системы позволяют собирать и анализировать данные о работе оборудования, что помогает выявлять потенциальные проблемы на ранних этапах и принимать своевременные меры для их устранения. Это особенно важно для поддержания непрерывности производства и минимизации простоев. [4]

В мировой практике существует множество примеров успешного внедрения современных технологий очистки газа на СПГ-заводах. Например, на заводах в Катаре и Австралии были внедрены комбинированные системы очистки, которые позволили значительно повысить эффективность процессов подготовки газа и снизить эксплуатационные затраты. В Катаре, на одном из крупнейших СПГ-заводов в мире, были использованы фильтры-коалесцеры с применением наноматериалов, что позволило достичь высокой степени очистки газа при минимальных затратах на обслуживание. В Австралии внедрение автоматизированных систем контроля и управления процессами очистки газа позволило снизить энергопотребление и повысить надежность работы оборудования. Эти примеры демонстрируют, что современные технологии очистки газа могут значительно повысить эффективность и надежность работы СПГ-заводов.

Заключение

Совершенствование процессов подготовки газа на СПГ-заводах является важным направлением для повышения эффективности и надежности работы всего производства. Использование современных фильтрующих материалов, таких как полипропилен и стекловолокно, а также внедрение новых технологий, таких как комбинированные фильтрующие системы и автоматизация процессов, позволяет значительно улучшить качество очистки газа и снизить эксплуатационные затраты. Дальнейшее развитие данного направления связано с внедрением наноматериалов, цифровизацией процессов и оптимизацией конструкций фильтров-коалесцеров. Эти меры позволяют

не только повысить эффективность процессов подготовки газа, но и улучшить экологическую безопасность производства.

Проведенный анализ подтверждает актуальность и перспективность оптимизации фильтрующих систем для повышения эффективности и надежности работы СПГ-заводов. Внедрение современных технологий очистки газа является важным шагом на пути к созданию более устойчивого и экологически безопасного производства сжиженного природного газа.

Список литературы

1. Фарахов Т.М., Исхаков А.Р., Минигулов Р.М. Высокоэффективное сепарационное оборудование очистки природного газа от дисперсной среды. // Электронный научный журнал нефтегазовое дело, 2011. - №6. – с. 263-277.
2. Фарахов Т.М., Минигулов Р.М. Современные технологии и оборудование для очистки природного газа. – М.: Изд-во «Энергоатомиздат», 2013. – 320 с.
3. Жерехов В.И. Технология подготовки природного газа. – М.: ГНУ НИИ нефти и газа, 2009. – 432 с.
4. Федорова Е.Б. Современное состояние и развитие мировой индустрии сжиженного природного газа: технологии, оборудование. – М.: Энергоатомиздат, 2021. – 328 с.

УДК 535.4, 536.25, 663.1

Мошин А.А., Румянцев Н.Г., Голованов И.Ю., Некрасов Д.А.

Совершенствование аппаратного оформления культивирования клеток в гидрогелевых материалах применительно к технологиям 3D-биопечати

Мошин Андрей Алексеевич – аспирант; a.moshin97@mail.ru

Румянцев Николай Генрихович – студент; rumyantsev.nikolay@gmail.com

Некрасов Дмитрий Анатольевич – к.т.н., доцент кафедры;

ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»,
Россия, Москва, 119454, Проспект Вернадского, дом 78.

Мошин Андрей Алексеевич – старший преподаватель кафедры;

Голованов Иван Юрьевич – к.т.н., ассистент кафедры;

Некрасов Дмитрий Анатольевич – к.т.н., заведующий кафедрой;

ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»,

Россия, Москва, 107023, ул. Большая Семеновская, дом 38.

В тезисах рассмотрены конструкции усовершенствованных биореакторов для процесса объемного культивирования клеток микроорганизмов. Усовершенствованные конструкции биореакторов запатентованы, что подтверждает их новизну и практическую значимость.

Ключевые слова: биореакторы, аппаратное оформление, гидрогель, культивирование клеток.

Improvement of the hardware design microorganisms in hydrogel materials in relation to 3D-bioprinting technologies

Moshin A.A.^{1,2}, Rumyantsev N.G.¹, Golovanov I.Yu.², Nekrasov D.A.^{1,2}

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

² Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

The theses discusses designs of advanced bioreactors for the process of volumetric cultivation of microbial cells. The improved bioreactor designs are patented, which confirms their novelty and practical significance.

Key words: bioreactors, hardware design, hydrogel, cell culture

Введение

В последние годы стремительно развивается регенеративная медицина и ключевую роль в этом процессе играют новые материалы. Особое внимание уделяется гидрогелям, которые позволяют создавать оптимальные условия для культивирования различных клеточных культур, а также дают возможность контролировать их свойства [1]. Широкий спектр характеристик гидрогелей приводит к тому, что исследование свойств зависит от множества факторов и открывает новые возможности для научного поиска. Огромное количество исследований уже посвящено изучению характеристик гидрогелей, разработке методов диагностики таких систем и совершенствованию технологий их производства [2,3].

Также одной из ключевых задач современной регенеративной медицины является разработка и совершенствование оборудования для последующего культивирования клеток, что делает это направление особенно актуальным для биоинженерии, медицинских и химических технологий. Цель культивирования микроорганизмов заключается в получении значительного объема биологически-активного продукта с высокой концентрацией жизнеспособных клеток. Для обеспечения оптимальных условий роста микроорганизмов необходимо учитывать множество факторов, таких как подача питательных веществ, удаление продуктов метаболизма, а также поддержание необходимых параметров среды. С этой точки зрения биореактор представляет собой аппарат, в котором одновременно происходят процессы тепло- и массообмена [4,5].

Теплообмен в биореакторе имеет критическое значение, поскольку большинство микроорганизмов чувствительны к температурным колебаниям. Избыточное тепло, выделяемое в результате метаболических реакций, должно эффективно отводиться для предотвращения перегрева культуры. В то же время поддержание равномерного температурного поля во всем объеме биореактора способствует стабильности роста клеток и повышению выхода целевого продукта.

Массообменные процессы в биореакторе включают диффузию питательных веществ и кислорода, а также удаление побочных продуктов жизнедеятельности. Неравномерность распределения кислорода или субстрата может привести к снижению эффективности роста культуры, образованию мертвых зон и накоплению токсичных метаболитов. Поэтому конструкция биореактора

должна обеспечивать равномерное распределение потоков, активную аэрацию и эффективное перемешивание.

Одним из перспективных направлений в развитии биотехнологических систем является совершенствование конструктивных элементов биореактора, направленное на повышение энергоэффективности и ресурсосбережения. Особое внимание уделяется элементам жизнеобеспечения, таким как инновационные системы подачи кислорода, методы оптимального распределения потоков и использование энергосберегающих технологий.

Экспериментальная часть

Оптимизация аппаратного оформления процессов культивирования клеток с целью снижения энергозатрат при получении заданного объема готового продукта является одной из актуальных задач современной промышленности. Повышение энергоэффективности в процессе культивирования клеток возможно за счет интенсификации тепло- и массообмена в биореакторе, что, в свою очередь, требует усовершенствования его элементов жизнеобеспечения.

Интенсификация культивирования клеток в биореакторах может осуществляться за счет механических устройств (например, перемешивающих или вибрационных), однако их использование приводит к усложнению конструкции, ограничению типов клеток и высоким энергозатратам, что оправдано лишь при необходимости быстрого роста культуры. Альтернативой являются биореакторы с элементами жизнеобеспечения, такими как полые микроканалы [6], мембранные трубки [7], фитили [8] и перфорированные трубки [9]. Они обеспечивают более низкую интенсивность культивирования, но обладают простой конструкцией, универсальностью.

Исследования [10] показали, что применение фитилей в качестве элементов жизнеобеспечения в биореакторах позволяет существенно повысить интенсивность тепло- и массообмена. Фитили представляют собой капиллярные структуры, которые за счет капиллярных эффектов обеспечивают равномерное распределение жидкости и газов в реакционной среде. Это способствует эффективному насыщению культуры кислородом, снижению градиентов концентрации питательных веществ и удалению излишков метаболитов, что в конечном итоге повышает продуктивность биопроцесса. Пример конструкции биореактора с фитилями представлен на (рис. 1).

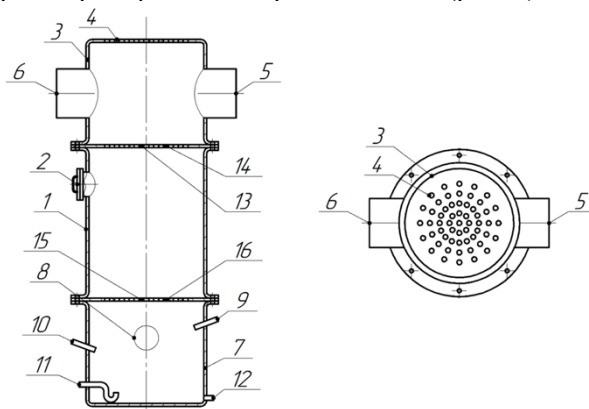


Рисунок 1 - Конструкция биореактора по патенту [8]: 1 – Емкость; 2 – Люк; 3 – Выпуклая крышка;

4 – Отверстия в выпуклой крышке для крепления фитилей; 5 – Патрубок ввода горячего воздуха;

6 – Патрубок вывода горячего воздуха; 7 – Выпуклое днище; 8 – Смотровое окно; 9 – Патрубок ввода воды; 10 – Патрубок вывода воздуха; 11 – Барботер; 12 – Патрубок слива воды; 13 – Верхняя пластина;

14 – Отверстия для прохода фитилей в верхней пластине; 15 – Нижняя пластина; 16 – Отверстия для прохода фитилей в нижней пластине

Биореактор функционирует за счет фитилей, пропущенных через отверстия 4, 14 и 16 в крышке 3 и пластинах 13, 15. В днище 7, заполненном водой через патрубок 10, уровень жидкости контролируется окном 8, а слив осуществляется через патрубок 12. Гидрогель с иммобилизованными клетками загружается в емкость 1 через люк 2. Воздух подается через барботер 11, насыщая воду кислородом, затем вода поднимается по фитилям за счет капиллярных сил. Растворенный кислород поступает в гидрогель, обеспечивая рост клеток, а метаболиты выводятся обратно через фитиль. При

обдуве горячим воздухом из патрубка 5 выше пластины 13 метаболиты испаряются и удаляются через патрубок 6.

Биореактор (рис.1) позволяет создавать развитую систему микроканалов с фитилями, однако в его конструкции отсутствуют средства контроля и оценки уровня газовой смеси и уровня кислорода во всем объеме рабочей среды. Таким образом определение достаточности развитости сети микроканалов затруднительно. Для исключения отмеченных недостатков и с использованием в качестве прототипа конструкции по патенту [8] (рис. 1), были разработаны и запатентованы биореакторы [11,12], представленные на (рис. 2) и (рис. 3).

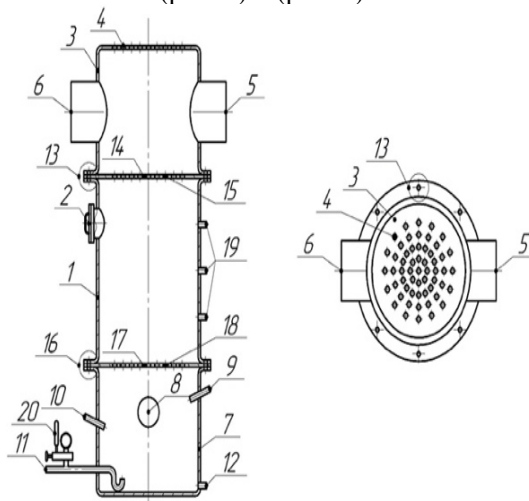


Рисунок 2 - Конструкция биореактора по патенту [11]: 1 – Емкость; 2 – Люк; 3 – Выпуклая крышка;

4 – Отверстия в выпуклой крышке для крепления фитилей; 5 – Штуцер подвода горячего воздуха; 6 – Штуцер отвода горячего воздуха; 7 – Выпуклое днище; 8 – Смотровое окно; 9 – Штуцер отвода газовой смеси; 10 – Штуцер подвода воды; 11 – Барботер; 12 – Штуцер слива воды; 13 – Фланцевое соединение; 14 – Верхняя пластина; 15 – Отверстия для прохода фитилей в верхней пластине;

16 – Фланцевое соединение; 17 – Нижняя пластина; 18 – Отверстия для прохода фитилей в нижней пластине; 19 – Газоанализаторы; 20 – Редуктор с расходомером

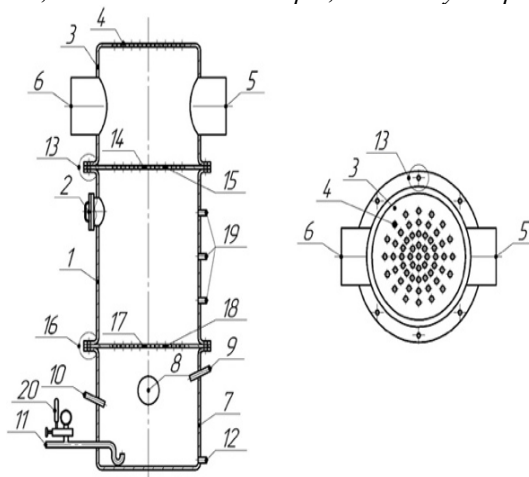


Рисунок 3 - Конструкция биореактора по патенту [12]: 1 – Емкость; 2 – Люк; 3 – Выпуклая крышка;

4 – Отверстия в выпуклой крышке для крепления фитилей; 5 – Штуцер подвода горячего воздуха; 6 – Штуцер отвода горячего воздуха; 7 – Выпуклое днище; 8 – Смотровое окно; 9 – Штуцер отвода газовой смеси; 10 – Штуцер подвода воды; 11 – Барботер; 12 – Штуцер слива воды; 13 – Фланцевое соединение; 14 – Верхняя пластина; 15 – Отверстия для прохода фитилей в верхней пластине;

16 – Фланцевое соединение; 17 – Нижняя пластина; 18 – Отверстия для прохода фитилей в нижней пластине; 19 – Датчики уровня кислорода; 20 – Редуктор с расходомером

Отличительными особенностями данных конструкций, в сравнении с прототипом [8], являются наличие установленных в корпусе 1 газоанализаторов 19 (рис. 2) для оценки уровня составляющих газовой смеси (в конструкции [11]), датчиков уровня кислорода 19 (рис. 3) для оценки уровня метаболитов в объеме гидрогеля (в конструкции [12]), а также снабжение барботера 11 редуктором с расходомером 20, позволяющих регулировать и управлять количеством подаваемой газовой смеси и, следовательно, позволяющих управлять ее растворенным в воде количеством.

Наличие в биореакторе газоанализаторов, датчиков уровня кислорода и редуктора с расходомером позволит проводить оценку развитости системы микроканалов для получения необходимого качества готового продукта по показателю процента живых клеток микроорганизмов в его объеме (что, например, важно в области 3D-биопечати [3]). Рациональное распределение системы микроканалов положительно отразится на энергосбережении при эксплуатации биореактора.

Заключение

Разработанные конструкции биореакторов обеспечивают эффективное поступление газовой смеси к клеткам и удаление их метаболитов по всему объему рабочей среды благодаря разветвленной системе фитилей. Новизна и практическая значимость данных конструкций подтверждены патентами. Примененные технические решения способствуют равномерному росту микроорганизмов во всем рабочем объеме биореактора при минимальных энергетических затратах, что значительно повышает энергоэффективность процесса объемного культивирования клеток.

Список литературы

1. Kumar V., Kaur H., Kumari A., Hooda G., Garg V., Dureja H. Drug delivery and testing via 3D printing // Bioprinting. 2023. 36 p.
2. Itapu B.M., Jayatissa A.H. A review in graphene/polymer composites // Chem. Sci. Int. J. 2018. Vol. 23, pp. 1-16.
3. Mercer T.K., Murphy S.V. Hydrogels for 3D bioprinting applications // Essentials of 3D Biofabrication and Translation. 2015. P. 249-270.
4. Junne S., P. Neubauer. How scalable and suitable are single-use bioreactors? // Current Opinion in Biotechnology. 2018. Vol. 53. P. 240-247.
5. Винаров А. Ю. Системный подход к выбору оптимального биореактора // Биотехнология: состояние и перспективы развития. 2015. С. 337-338.
6. Покусаев Б.Г., Вязьмин А.В., Захаров Н.С., Храмцов Д.П., Некрасов Д.А. Нестационарный массоперенос питательных веществ в гелях с каналами различной пространственной структуры // Теоретические основы химической технологии. 2020. Т. 54, № 2. С. 163-175.
7. Патент РФ № 117916, 10.07.2012.
8. Патент РФ № 219502, 20.07.2023.
9. Патент РФ № 2430153, 27.09.2011.
10. Вязьмин А.В., Шумова Н.В., Лагуткин М.Г., Сулягина О.А. Технология и аппаратное оформление процесса объемного культивирования аэробных клеток в гидрогеле // Повышение энергоресурсоэффективности, экологической и технологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности (ISTS "EESTE-2024"): Сборник научных трудов международного научно-технического симпозиума, посвященного 120-летию со дня рождения П.Г. Романкова. – Москва: Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), 2024. С. 64-68.
11. Патент РФ № 229942, 06.11.2024.
12. Патент РФ № 230739, 18.12.2024.

УДК 661.811

Немерюк А.М., Назаров В.И., Попов А.П., Макаренков Д.А., Калачева В.Р.

Особенности технологии утилизации литиевых аккумуляторов со смешанным катодом и с получением металлического никеля селективным восстановлением

Немерюк Алексей Михайлович – инженер-технолог;

Назаров Вячеслав Иванович – к.т.н., доцент, заместитель начальника отдела;

Попов Александр Павлович – научный сотрудник; schrei6@yandex.ru

Макаренков Дмитрий Анатольевич – д.т.н., доцент, первый заместитель руководителя ККХИ (ИРЕА) по научной работе.

Калачева Виктория Радиковна – лаборант-исследователь;

НИЦ «Курчатовский институт»,

Россия, Москва, 123182, Площадь академика Курчатова, 1.

В тезисах проанализирован технологический цикл утилизации литиевых аккумуляторов со смешанным катодным материалом. Проанализированы существующие методы утилизации, такие как пирометаллургические, гидрометаллургические и комплексные. Приведены результаты исследования процессов утилизации аккумуляторов со смешанным катодом. Описаны особенности технологических процессов выщелачивания, осаждения и селективного восстановления различными реагентами с получением металлического никеля. В качестве дополнительных стадий технологического цикла используются процессы распылительной сушки и обжига.

Ключевые слова: литиевые аккумуляторы; смешанный катод; выщелачивание; осаждение; селективное восстановление; металлический никель

Features of the recycling technology of lithium batteries with mixed cathodes and obtaining metallic nickel by selective reduction

Nemeryuk A.M.¹, Nazarov V.I.¹, Popov A.P.¹, Makarenkov D.A.¹, Kalacheva V.R.¹

¹ NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russian Federation

The abstract analyzes the technological cycle of recycling lithium batteries with mixed cathode material. The existing recycling methods, such as pyrometallurgical, hydrometallurgical and complex, are analyzed. The results of the study of recycling processes for batteries with mixed cathode are presented. The features of the technological processes of leaching, precipitation and selective reduction with various reagents to obtain metallic nickel are described. Spray drying and roasting processes are used as additional stages of the technological cycle.

Keywords: lithium batteries; mixed cathode; leaching; precipitation; selective reduction; metallic nickel

Введение

В настоящее время химические источники тока (ХИТ) находят широкое применение в различных отраслях промышленности. При этом отработанные аккумуляторы необходимо утилизировать из-за опасных веществ в виде соединений кобальта, лития, марганца, никеля, цветных и тяжелых металлов [1]. Отработанные ХИТ содержат токсичные вещества такие как HF и PF₅, диметоксиэтан, пропиленкарбонат [1-3].

Химические источники тока, как первичные батарейки, так и вторичные аккумуляторы, заключены в корпус, содержащий анодные и катодные материалы, а также электролит и вспомогательные компоненты. К ним относятся разделительные мембраны, токопроводящие проводники, изоляционные материалы.

По составу активного катодного материала ХИТ подразделяются на литий-кобальтовые LiCoO₂ (LCO), литий-марганцевые LiMn₂O₄ (LMO), литий-железо-фосфатные LiFePO₄ (LFP), литий-никель-марганец-кобальт-оксидные Li(NiMnCo)O₂ (NMC), литий-никель-кобальт-алюминий-оксидные Li(NiCoAl)O₂ (NCA) [4].

Утилизацию ХИТ осуществляют в основном тремя методами: пирометаллургическим, гидрометаллургическим и комбинированным.

Пирометаллургический метод включает извлечение металлов из руды или других материалов при температуре (≈1400 °C). За рубежом используют пирометаллургическую технологию, по которой отработанные ХИТ загружаются непосредственно в печь и выплавляются при высоких температурах (t>1000°C). Содержащиеся в них полимеры, электролит и углеродсодержащие компоненты сгорают и удаляются в виде газовой фазы, а металлы Co, Ni, Cu и другие собираются в виде расплавов. При такой термической обработке образуются опасные газовые выбросы, которые

должны подвергаться очистке до экологических норм. В этом процессе литий не восстанавливается, а теряется в виде шлака с другими тугоплавкими оксидами и газами [5].

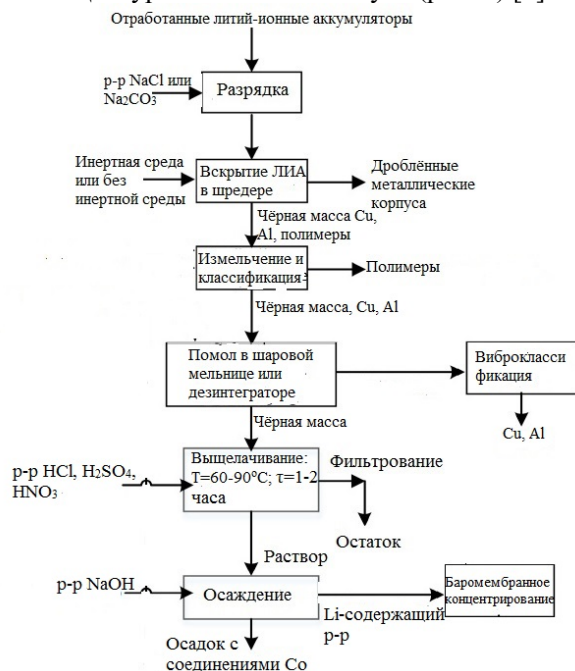
Гидрометаллургический метод включает стадии: 1) разрядка аккумуляторов; 2) демонтаж аккумуляторов с отделением пластика, металлов с катода и анода в виде алюминиевой и медной фольги; 3) удаление соединений алюминия с катода растворением в растворе NaOH; 4) сушка при температуре $t = 60^\circ\text{C}$ и времени сушки $\tau_{\text{суш}} = 24$ ч; 5) прокаливание ($t = 610^\circ\text{C}$, $\tau = 24$ ч); 6) дробление и помол; 7) выщелачивание в системе «жидкость-твёрдое» в органических или минеральных кислотах с использованием в качестве восстановителя перекиси водорода (H_2O_2); 8) фильтрация экстрагента от примесей в нутч-фильтрах; 9) осаждение в системе «жидкость-жидкость» с образованием осадка-полупродукта; 10) фильтрация осадка; 11) сушка порошкообразной части осадка ($t = 100^\circ\text{C}$, $\tau_{\text{суш}} = 24$ ч); 12) прокаливание ($t = 450^\circ\text{C}$, $\tau_{\text{пр}} = 24$ ч); 13) помол ($\tau_{\text{пом}} = 0,5$ ч); 14) прокаливание ($t = 900^\circ\text{C}$, $\tau_{\text{пр}} = 12$ ч); 15) выделение целевого продукта в виде $\text{Li}(\text{NiMnCo})\text{O}_2$.

В технологическом цикле проводится дополнительная обработка отработанной органической кислоты после экстракции для её возврата в процесс.

Комплексный или гибридный методы сочетают в одном технологическом цикле гидро- и пирометаллургические процессы. В этом методе для получения технологического углерода используется пиролиз графита и полимерных компонентов аккумуляторов, что повышает чистоту полученных целевых продуктов.

В рассмотренных трех методах утилизации для удаления органической фазы (связующего, электролита, графита) используются сжигание, обжиг или пиролиз. При сжигании и обжиге образуется газообразная фаза, содержащая оксиды азота, углерода, диоксины, фураны ($\text{C}_4\text{H}_4\text{O}$) и требующая использования сложной системы очистки. Более перспективным процессом является низкотемпературный пиролиз [6]. Это обеспечивает перевод графита и других органических компонентов в технический углерод, а образующаяся газовая фаза может быть использована как топливо.

С учетом вышеизложенного нами были проведены дополнительные исследования по процессам вскрытия ХИТ, измельчения на ножевой роторной мельнице и помола на шаровой мельнице и процессам выщелачивания механоактивированных порошков различных фракций после шаровой мельницы. На основе полученных данных была модернизирована технологическая схема утилизации ХИТ, ранее разработанная в НИЦ «Курчатовский институт» (рис. 1) [7].



Экспериментальная часть

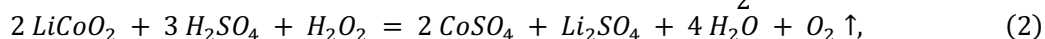
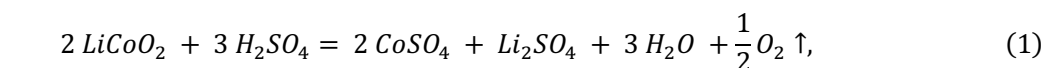
Применяемые в различных отраслях химические источники тока, содержат в своем составе катодные материалы, в виде оксидных систем на основе кобальта, никеля и марганца (кобальтат лития, смешанные оксиды никеля, кобальта, лития). Для изучения процессов комплексной переработки, отработанных ХИТ, содержащих соединения никеля и кобальта, были исследованы стадии утилизации. Они позволяют разделить входящие в состав аккумулятора компоненты и осуществить регенерацию катодных материалов с целью повторного использования.

После вскрытия на шредере ХИТ и измельчения элементов на мельницах смесь катодных и анодных материалов отделяется от крупных фрагментов металла и пластика. Для этого используется виброклассификатор с высокой эффективностью разделения. Анодный материал был представлен в основном графитом. В результате классификации на ситах получается смесь, состоящая из мелкодисперсных зерен графита и смеси оксидов металлов.

Ранее нами использовались при выщелачивании азотная или соляная кислоты [7]. Для получения на конечной стадии металлического никеля и соединений кобальта, выщелачивание из механоактивированного порошка осуществляется серной кислотой и в присутствии восстановителя H_2O_2 . Механоактивацию проводили на шаровой мельнице при времени $\tau = 2$ часа.

В процессе выщелачивания образуются сульфаты кобальта, никеля и марганца, растворимые в воде. Процесс выщелачивания проводят с использованием магнитной мешалки в течение 60-120 мин.

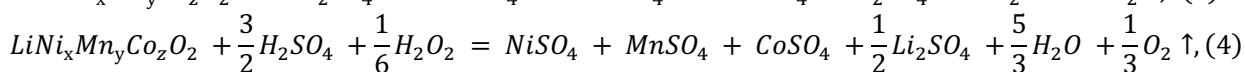
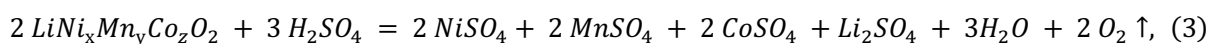
Нерастворимые примеси, главным образом графит, отделяют фильтрованием на вакуумном нутч-филт্রে. При выщелачивании механоактивированных порошков литий кобальтовых аккумуляторов в растворе серной кислоты с концентрацией 3М при $pH = 2-3$ протекают следующие реакции:



Необходимо отметить, что реакция между кислотой и материалом ХИТ при одновременном вводе H_2O_2 протекает с резким выделением тепла. Поэтому после первичного взаимодействия между катодным материалом и серной кислотой добавляют H_2O_2 (реакция 2). На стадии выщелачивания используют перекись водорода, которая является катализатором, способствующим образованию растворимых сульфатов двухвалентных кобальта и лития. При этом так же выделяется газообразный кислород.

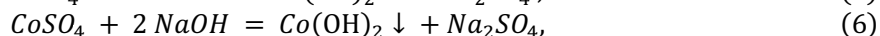
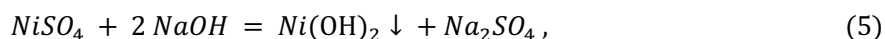
После выщелачивания проводится стадия фильтрования, в ходе которого отделяются нерастворимые частицы графита и других примесей. Раствор, имеющий pH близкий к 1, направляется на стадию нейтрализации.

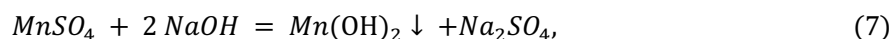
Дальнейшие исследования проводили на комбинированных аккумуляторах, содержащих литий, никель, марганец и кобальт. Выщелачивание проводили в реакторах с магнитными мешалками в турбулентном режиме при протекании следующих реакций:



Полученный на стадии выщелачивания комбинированных ХИТ раствор содержит сульфаты указанных металлов и лития, а также свободную серную кислоту с органическими примесями. Смесь содержит остатки электролита с продуктами его химического разложения, вызванного воздействием серной кислоты и перекиси водорода.

Затем проводится фильтрование на нутч-филт্রে с отделением нерастворимых частиц графита с примесями. Раствор при $pH = 1$, затем направляется на стадию нейтрализации. Нейтрализация кислого раствора, содержащего сульфаты никеля, кобальта и марганца производится с помощью расчётного количества раствора гидроксида натрия. При перемешивании в растворе достигается $pH = (7,5-8)$. В результате нейтрализации образуется осадок смеси гидратированных оксидов металлов, а также растворы сульфатов натрия и лития. Затем снова проводят фильтрование и промывку нерастворимого осадка водой для удаления сульфатов натрия и лития. При этом протекают следующие реакции

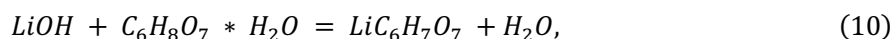




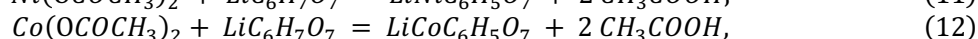
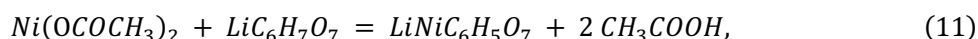
Смесь гидратированных оксидов растворяют в уксусной кислоте и получают раствор с ацетатами металлов:



Затем получают однозамещенный цитрат лития, используя гидроксид лития и уксусную кислоту в виде кристаллов:



К полученному раствору добавляют раствор однозамещенного цитрата лития



При этом гидратированный оксид марганца при контакте с воздухом легко окисляется с образованием оксида марганца MnO_2 . Он не вступает в реакцию с уксусной кислотой и удаляется при фильтровании раствора:



Таким образом при взаимодействии однозамещенного цитрата лития с ацетатами никеля и кобальта образуется водный раствор ацетато-цитратной соли с концентрацией твердой фазы 4 % масс. Полученный раствор затем высушивают в распылительной сушилке [8]. В результате получается порошкообразный продукт.

Полученные порошки, затем подвергаются низкотемпературному обжигу. В результате обжига образуется кобальтат лития и металлический никель. При этом в состав металлического никеля не входят соединения кобальта, что подтверждается результатом рентгено-фазового анализа (РФА) (рис. 2.). Далее, используя магнитную сепарацию, отделяют от соединений кобальта металлический никель, который является целевым продуктом.

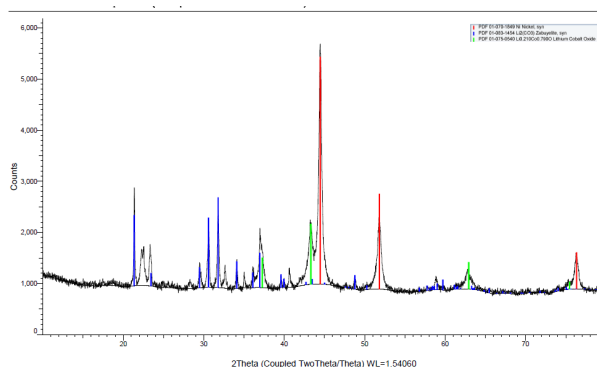


Рисунок 2 - Результат рентгенофазового анализа порошкообразного продукта при селективном восстановлении никеля

Заключение

Проанализированы существующие методы утилизации, такие как пирометаллургические, гидрометаллургические и комплексные. Выявлены их достоинства и недостатки. Комплексный метод был использован при разработке технологического процесса утилизации литиевых аккумуляторов со смешанным катодом. Приведены результаты исследования процессов выщелачивания механоактивированных порошков с использованием серной, соляной и азотной кислот. Показана возможность получения из комплексных аккумуляторов $Li(NiMnCo)O_2$ с использованием уксусной и лимонной кислот соединений кобальта и металлического никеля.

Аналитические исследования выполнены с использованием научного оборудования ЦКП «Исследовательский химико-аналитический центр НИЦ «Курчатовский институт»

Список литературы

1. Huang B., Pan Z., Su X., An. L. Recycling of lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives//J. Power Sources. 2018. Vol. 399. P. 274-286.
2. Aral H. Vecchio-Sadus A. Toxicity of lithium to humans and the environment – a literature review//Ecotoxicol. Environ. Saf. 2008. Vol. 70. P. 349-356.
3. Ярмоленко О.В., Юдина А.В., Игнатова А.А. Современное состояние и перспективы развития жидких электролитных систем для литий-ионных аккумуляторов//Электрохимическая энергетика. 2016. Т. 16. № 4. С. 152-192.
4. Титов А.А., Воробьева М.В., Куршева В.В., Гусев А.Л. Перспективные катодные материалы для литий-ионных источников тока: преимущества и недостатки//Альтернативная энергетика и экология. 2011. №12. С. 112-126.
5. Tesfaye F., Lindberg D., Hamuyuni J., Taskien P., Hupa L. Improving urban mining practices for optimal recovery of resources from e waste//Miner Eng. 2017. Vol. 111. P. 209-221.
6. Назаров В. И. Техника и технология совмещенных процессов переработки твердых отходов: учебное пособие/В.И. Назаров, Р.А. Санду, Д.А. Макаренков, Н.Е. Николайкина – Москва: ИНФРА-М, 2020. -456 с. – (Высшее образование: Бакалавриат).
7. Назаров В.И., Ретивов В.М., Макаренков Д.А, Афлятунова Г.Р., Кузнецова Н.А., Попов А.П. Исследование многостадийной комплексной технологии переработки литий-кобальтовых источников тока с получением импортозамещающих соединений кобальта и лития//Металлург. 2023. №8. с. 108-118.
8. Назаров В.И., Макаренков Д.А., Попов А.П., Афлятунова Г.Р., Трубачев Н.Ю. Разработка процессов и технологий получения порошков и гранул методами распылительной сушки и окатывания на тарельчатом грануляторе//Промышленные процессы и технологии. 2022. Т. 2. №1. С. 66-77.

УДК 66.087

Нестерова А.В., Маслова В.В., Носырев М.А., Ильина С.И., Равичев Л.В.

Электроперенос в химической технологии

Нестерова Алиса Витальевна – студент группы МТ-11, alisa2002nesterova@mail.ru;

Маслова Василиса Владимировна – студент группы МТ-11;

Носырев Михаил Андреевич - к.т.н., доцент кафедры процессов и аппаратов химической технологии;

Ильина Светлана Игоревна – к.т.н., доцент кафедры процессов и аппаратов химической технологии, electis@yandex.ru;

Равичев Леонид Владимирович – д.т.н., заведующий кафедрой процессов и аппаратов химической технологии;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В статье рассматривается проблема недостаточной освещенности влияния разности электрических потенциалов на процессы в химической технологии. Предлагается включение раздела электропереноса в курс процессов и аппаратов химической технологии. Так же показано получение уравнения конвективной электропроводности.

Ключевые слова: электроперенос, критериальные уравнения, уравнение переноса субстанции, уравнения конвективной электропроводности.

Electrical transfer in chemical technology

Nesterova A.V., Maslova V.V., Nosyrev M.A., Ilyina S.I., Ravichev L.V.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The article discusses the problem of insufficient illumination of the effect of electric potential differences on processes in chemical technology. It is proposed to include the electrical transfer section in the course of processes and devices of chemical technology. The equation of convective electrical conductivity is also shown.

Keywords: electrical transfer, criterion equations, equation of substance transfer, equations of convective electrical conductivity.

Введение

Современная химическая технология стоит на пороге трансформации, вызванной необходимостью переосмысления фундаментальных подходов к описанию процессов переноса. В частности, можно отметить растущую роль использования электричества в химическом производстве. Актуальность этого направления подтверждается как технологическими вызовами (от создания энергоэффективных систем опреснения до разработки элементов топливных ячеек), так и теоретическими пробелами в существующих учебных программах.

Исторически сложилось, что электромагнитные явления рассматривались изолированно от видов переноса, традиционно изучаемых в дисциплине процессов и аппаратов химической технологии (ПАХТ). Однако практика последних десятилетий демонстрирует парадокс: такие критически важные процессы, как электродиализ в водоподготовке, электрофлотация в очистке сточных вод, применение электрофильтров в очистке воздуха от пыли остаются «периферийными» темами в образовательных стандартах.

Основная часть

Наши исследования электропереноса начались с изучения мембранных процессов под действием разности электрических потенциалов. Наиболее распространенным примером такого процесса является электродиализ и его разновидности, например, электродеионизация [1].

Электродиализ находит широкое применение в различных областях:

- Обессоливание природных и промышленных вод.
- Получение деионизованной воды для медицины, электроники и энергетики.
- Отделение электролитов от неэлектролитов в пищевой промышленности.
- Получение чистых кислот и щелочей с использованием биполярных мембран.
- Производство электроэнергии методом обратного электродиализа.
- Выделение редкоземельных элементов.

Мы столкнулись с тем, что основной проблемой при изучении электропереноса в химической технологии является отсутствие универсального математического описания, объединяющего электрохимические и традиционные явления переноса (тепловые, гидромеханические и массообменные). Существующие подходы к расчёту электролизных установок опираются на эмпирические выражения, что снижает точность прогнозирования. Ситуация усугубляется тем, что даже базовые уравнения Максвелла и Альвена, описывающие электромагнитные процессы в движущихся средах, редко включаются в учебные курсы из-за сложности нахождения аналитического решения, часто требующего введения многочисленных допущений.

В связи с этим были предприняты попытки применения традиционных подходов к созданию универсального математического описания, заключающегося в использовании критериальных уравнений. Соответственно, для этого необходимы критерии электрического подобия. Анализ таких критериев, используемых в литературе, показывает, что их получают методом аналогии с тепловыми числами подобия, выводимыми из уравнения Фурье-Кирхгофа. Таким образом, перед нами стояла задача получения уравнения электропереноса.

В качестве отправной точки было выбрано уравнение переноса субстанции:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = -\operatorname{div} \bar{J} + \gamma, \quad (1)$$

где φ – потенциал переноса – удельная (отнесенная к объему) характеристика,

$\bar{J}$ – плотность потока,

γ – плотность притока.

Так как основной характеристикой электрических явлений является электрический заряд, то в качестве потенциала переноса была выбрана объемная плотность заряда ρ_v :

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial \tau} = -\operatorname{div} \bar{J}_q + \gamma_q, \quad (2)$$

где ρ_v – объемная плотность заряда, [Кл/м³],

γ_q – составляющая внешних сил, [Кл/м³·с].

Плотность потока заряда, как и в уравнении переноса субстанции, состоит из молекулярной и конвективной составляющих, представленных далее уравнениями:

$$\bar{J}_{qm} = -\sigma \frac{\partial U}{\partial n}, \quad (3)$$

где $\bar{J}_{qm}$ – плотность потока заряда на молекулярном уровне, $\left[\frac{\text{Кл}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}\right]$;

σ – удельная электропроводность, $\left[\frac{\text{См}}{\text{м}}\right]$;

U – напряжение, [В].

И

$$\bar{J}_{qk} = \vec{\omega} \cdot \rho_v, \quad (4)$$

$\bar{J}_{qk}$ имеет размерность $\left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \frac{\text{Кл}}{\text{м}^3}\right] = \left[\frac{\text{Кл}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}\right]$.

Преобразуя уравнение потенциала переноса при $\gamma_q = 0$, получаем уравнение:

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial \tau} = -\operatorname{div} \left(-\sigma \frac{\partial U}{\partial n} + \vec{\omega} \rho_v \right), \quad (5)$$

С учетом того, что заряд и напряжение связаны емкостью:

$$C = \frac{q}{U}, \quad (6)$$

где C – емкость, $[C] = \left[\frac{\text{Кл}}{\text{В}}\right]$; q – заряд [Кл], а напряжение можно выразить через плотность заряда:

$$U = \frac{\rho_v \cdot V}{C} = \frac{\rho_v \cdot m}{C \cdot \rho} = \frac{\rho_v}{C_m \cdot \rho}, \quad (7)$$

где C_m – удельная емкость (емкость, отнесенная к массе среды), $\left[\frac{\text{Кл}}{\text{В} \cdot \text{кг}}\right]$; ρ – плотность среды, [кг/м³].

Далее, подставляя полученное уравнение (7) в уравнение электропроводности (3) можно получить уравнение плотности потока заряда на молекулярном уровне в виде:

$$\bar{J}_{qm} = -\sigma \cdot \operatorname{grad}(\rho_v / C_m \rho) = -\frac{\sigma}{C_m \rho} \operatorname{grad} \rho_v, \quad (8)$$

где $\frac{\sigma}{C_m \rho} = b$ – «коэффициент зарядопроводности», $\left[\frac{\text{См} / \text{м}}{\frac{\text{Кл}}{\text{В} \cdot \text{кг}} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}\right] = \left[\frac{\frac{\text{Кл}}{\text{с}}}{\frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}}\right] = \left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}}\right]$.

Тогда можно уравнение (5) можно записать:

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial \tau} + \operatorname{div} \bar{\omega} \rho_v = b \operatorname{div} \operatorname{grad} \rho_v, \quad (9)$$

а с учетом математических преобразований:

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial \tau} + \rho_v \operatorname{div} \bar{\omega} + \bar{\omega} \operatorname{grad} \rho_v = b \nabla^2 \rho_v, \quad (10)$$

Вид данного уравнения может учитывать перенос заряда в различных средах (как в неразрывных, так и при наличии кавитации).

Если поток неразрывен ($\operatorname{div} \bar{\omega} = 0$):

$$\frac{\partial \rho_v}{\partial \tau} + \omega_x \frac{\partial \rho_v}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial \rho_v}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial \rho_v}{\partial z} = b \nabla^2 \rho_v, \quad (11)$$

Полученное уравнение (11), аналогично уравнению Фурье-Кирхгофа, представляет уравнение конвективной электропроводности. Так же размерность коэффициента «зарядопроводности», названного на подобии с коэффициентом температуропроводности, имеет ту же самую размерность, что и коэффициенты кинематической вязкости, температуропроводности, диффузии.

Предложенное уравнение имеет тот же потенциал переноса ρ_v (объемную плотность заряда), что и уравнения Максвелла, тем самым подтверждая общность типов переноса материи: переноса на микроуровне, на макроуровне (конвекцией) и волнами.

Так как объемная плотность заряда ρ_v зависит от напряжения U , то можно сделать вывод, что слагаемое $\frac{\partial \rho_v}{\partial \tau}$, включающее частную производную напряжения по времени $\frac{\partial U}{\partial \tau}$ (так как $\frac{\partial \rho_v}{\partial \tau} = C_m \rho \frac{\partial U}{\partial \tau}$), характеризует параметры переменного тока.

Таким образом, уравнение не противоречит существующим законам переноса. На основании этого можно:

- 1) составить критериальные уравнения;
- 2) включить электроперенос в курс ПАХТ.

В этом случае картину типовых процессов, используя системный анализ, предложенный в работе [2], можно представить следующим образом:

Таблица 1

Модернизированная схема составляющих типовых процессов химической технологии

	Механические/ Электрические процессы	Гидро- динамиче- ские процес- сы	Тепло- обменные процессы	Массо- обменные процессы	Химические процессы	Био- химические процессы
Биохимиче- ская кинетика						+
Химическа- я кинетика					+	+
Диффузион- ная кинетика				+	+	+
Термокине- тика			+	+	+	+
Гидродина- мическая структура потоков		+	+	+	+	+
Фундамент- альные законы механики и/или электродин- амики	+	+	+	+	+	+

Иллюстрацией такого подхода могут быть процессы:

- 1) Формирование материала – электроспиннинг.
- 2) Изменение физико-химических параметров системы при наложении электрического поля (изменение вязкости согласно закону Эйнштейна) оказывает влияние на гидродинамику.
- 3) Обогрев материалов с помощью электрического тока.
- 4) Электродиализ (электромассообменный процесс).
- 5) Электролиз (электрохимический процесс).
- 6) Электрофорез (используется в биотехнологии).

Заключение

Включение электропереноса в учебную дисциплину «Процессы и аппараты химической технологии» имеет важное значение. Интегрируя электрические явления в фундаментальное понимание процессов переноса, мы можем вооружить будущих инженеров знаниями и навыками для инноваций в таких областях, как электродиализ, электролиз, электрофлотация, электрофильтрация, электроспиннинг и другие технологии, основанные на действии разности электрических потенциалов.

Современные учебные программы по химической инженерии уже начинают включать элементы электропереноса. Например, в Имперском колледже Лондона студенты изучают основы электрохимии и электрохимических процессов в рамках курса по химическим основам промышленных процессов [3]. Аналогично, в Северо-Западном университете США курс по анализу химических процессов включает элементы электрохимического анализа.

Полномасштабное включение не только улучшит понимание электропереноса, но и будет способствовать развитию химической технологии, а именно:

- Ликвидирует концептуальный разрыв между электрохимией и процессами переноса.
- Предоставит студентам целостную картину взаимодействий в химико-технологических системах.
- Сформирует методологическую базу для инноваций в области электрохимических технологий.

Список литературы

1. Ильина С.И., Сахапов Д.Р., Маслова В.В., Быков В.И., Равичев Л.В. Электромембранные процессы – задачи и решения // Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. Том XXXVIII, № 1 (280). — М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2024. — С. 97-100.
2. Основы конструирования и проектирования промышленных аппаратов: Учебное пособие для вузов/Ю.А. Комиссаров, Л. С. Гордеев, Д. П. Вент - М.: Химия, 1997. -368 с.
3. Chemical Engineering MEng: сайт. — URL: <https://www.imperial.ac.uk/study/courses/undergraduate/chemical-engineering/> (дата обращения: 01.03.2025)

УДК: 66.048;621.577

Носов Г.А., Уваров М.Е., Багаутдинов Н.П.

Использование тепловых насосов закрытого типа при ректификации гетероазеотропных смесей

Носов Геннадий Алексеевич – д.т.н., профессор

Уваров Михаил Евгеньевич – к.т.н., старший преподаватель; uvamikhail@yandex.ru

Багаутдинов Никита Павлович – аспирант

ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»,

Россия, Москва, 119454, проспект Вернадского, дом 78.

Рассмотрено использование тепловых насосов закрытого типа при проведении процесса ректификации бинарных гетероазеотропных смесей. Описан ряд схем такого разделения. Проведена оценка энергетических и стоимостных затрат при их применении. Показано, что использование тепловых насосов позволяет существенно снизить энергетические и стоимостные затраты на проведение процесса разделения рассматриваемых смесей.

Ключевые слова: ректификация, гетероазеотропные смеси, схемы разделения, энергосбережение, тепловые насосы.

The use of closed-type heat pumps in the rectification of heteroazeotropic mixtures

Nosov G.A., Uvarov M.E., Bagautdinov N.P.

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

The use of closed-type heat pumps during the rectification process of binary heteroazeotropic mixtures is considered. A number of schemes for such separation are described. An assessment of energy and cost costs in their application has been carried out. It is shown that the use of heat pumps can significantly reduce the energy and cost costs of the separation process of the mixtures under consideration.

Key words: rectification, heteroazeotropic mixtures, separation schemes, energy saving, heat pumps.

Как известно [1], процесс ректификации широко используется для разделения различных смесей, а также для очистки большого числа веществ. Однако, проведение данного процесса связано с значительными затратами тепловой энергии. В силу этого важной задачей химической технологии является снижение энергоемкости такого разделения.

Одним из эффективных путей решения данной задачи является использование при проведении процесса ректификации различных тепловых насосов [2-6]. Заметим, что в настоящее время при проведении технологических процессов наиболее часто применяются парокompрессионные тепловые насосы, которые бывают двух типов: открытого и закрытого типов. При использовании открытых тепловых насосов в качестве рабочего тела выступают пары дистиллятов ректификационных колонн, при сжатии которых компрессором повышается их температурный потенциал, и они могут быть использованы для обогрева кубов колонн. В случае применения тепловых насосов закрытого типа в качестве рабочего тела выступают промежуточные теплоносители, которые циркулируют в замкнутом контуре. Аппаратурное оформление ректификационных установок с закрытыми тепловыми насосами, как правило, несколько сложнее, чем при применении тепловых насосов открытого типа. Однако при использовании последних может возникнуть опасность загрязнения продуктов разделения.

В рамках данной работы нами был рассмотрен процесс разделения бинарных гетероазеотропных смесей методом ректификации с использованием тепловых насосов закрытого типа. Особенностью таких смесей является то, что в определенном диапазоне концентраций температуры их кипения и состав образующихся паров остаются постоянными. При конденсации же паров образуются две жидкие фазы состава x_{H1} и x_{H2} .

Как известно [1], разделение бинарных гетероазеотропных смесей с получением достаточно чистых компонентов производится с применением двух ректификационных колонн. На рис.1 показана принципиальная схема разделения для случая, когда состав исходной смеси F находится в диапазоне концентраций $x_F < x_{H2}$. При таком разделении конечные продукты получают в виде кубовых остатков W_1 и W_2 , а пары дистиллятов D_1 и D_2 после их конденсации подают на декантер D на расслаивание. Образующиеся жидкие фазы H_1 и H_2 возвращают в колонны в качестве флегмы.

При фракционировании гетероазеотропных смесей они обычно подаются на разделение в парообразном состоянии. Поэтому они перед подачей в колонну P_1 частично или полностью

конденсируются. Для чего используется теплообменник Т. Обогрев кубов колонн осуществляется обычно с использованием индустриального пара. При этом расход тепла в кубах колонн составляет Q_{K1} и Q_{K2} , а при конденсации паров дистиллятов в конденсаторах K_1 и K_2 отводятся тепловые потоки Q_{D1} и Q_{D2} .

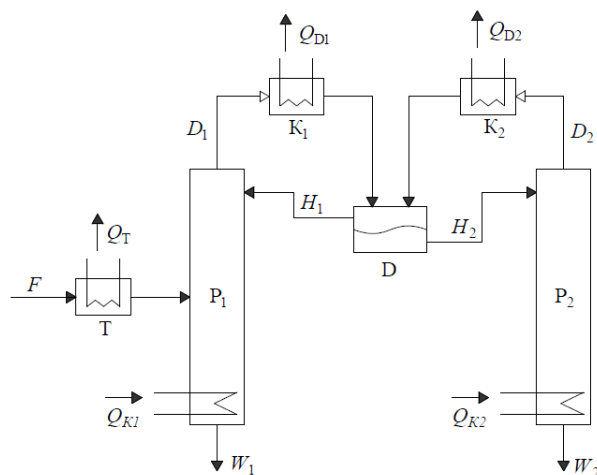


Рисунок 1 - Принципиальная схема разделения гетероазеотропной смеси ($x_F < x_{H1}$, вариант О.1)

Если состав исходной смеси находится в диапазоне концентраций $x_{H1} < x_F < x_{H2}$, то после ее конденсации в теплообменнике Т она подается в декантер Д. Если же состав исходной смеси $x_F > x_{H2}$, то после охлаждения ее следует направить в колонну P_2 .

Применение тепловых насосов позволяет теплоту, выделяющуюся при конденсации исходных смесей, использовать для обогрева кубов ректификационных колонн. В зависимости от состава исходной смеси и организации материальных и тепловых потоков возможен целый ряд вариантов схем разделения.

На рис.2 показана одна из схем разделения, при применении которой теплота конденсации исходной смеси F состава $x_F < x_{H1}$ используется для обогрева куба колонны P_1 . В данном случае исходная смесь F первоначально перед ее подачей в ректификационную колонну P_1 проходит через испаритель теплового насоса И, где она полностью или частично конденсируется. В результате этого происходит испарение промежуточного теплоносителя G_X . Пары теплоносителя после испарителя И подаются в компрессор ТК, где сжимаются от давления p_1 до давления p_2 , в результате чего повышается их температурный потенциал. Затем пары теплоносителя направляются на обогрев куба ректификационной колонны P_1 , где они конденсируются. Образующийся конденсат теплоносителя проходит дроссельный вентиль ДВ, где давление снижается с p_2 до p_1 и снова поступает в испаритель И. Таким образом промежуточный теплоноситель циркулирует в замкнутом контуре теплового насоса.

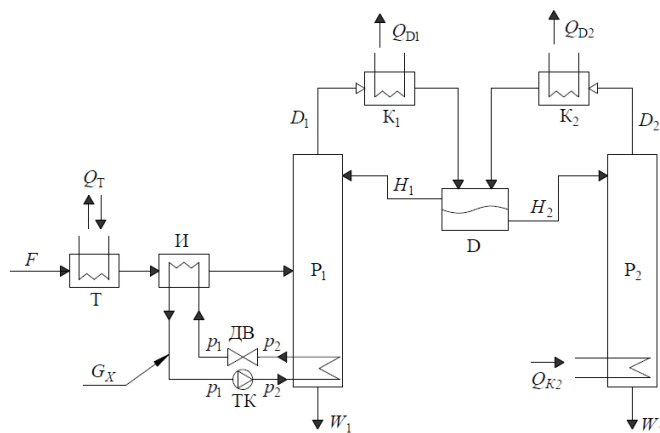


Рисунок 2 - Принципиальная схема разделения с использованием теплоты исходной смеси F для обогрева колонны P_1 ($x_F < x_{H1}$, вариант В.1).

Заметим, что количество тепла, выделяющегося при конденсации паров исходной смеси, Q_F перед ее подачей в колонну P_1 может быть больше или же меньше расхода тепла для обогрева куба данной колонны Q_{K1} . Для балансировки указанных тепловых потоков на линии подачи исходной смеси в колонну P_1 предусмотрен теплообменник Т. Если окажется, что $Q_F > Q_{K1}$, то с помощью данного теплообменника от исходной смеси следует отвести тепловой поток Q_T . Если же будет наблюдаться обратная картина $Q_F < Q_{K1}$, то с помощью теплообменника необходимо подвести недостающее количество тепла $Q_T = Q_{K1} - Q_F$.

В целом ряде случаев количества тепла, выделяющегося при конденсации исходной смеси Q_F , может быть достаточным для обогрева кубов обеих колонн. В этом случае принципиальная схема установки имеет вид (рис. 3).

На рис.4 показана схема установки для варианта разделения, когда состав исходной смеси находится в диапазоне концентраций $x_{H1} < x_F < x_{H2}$. При этом теплота конденсации исходной смеси Q_F с применением теплового насоса используется для обогрева куба колонны P_1 . Конденсат исходной смеси из испарителя И подаётся в декантатор D.

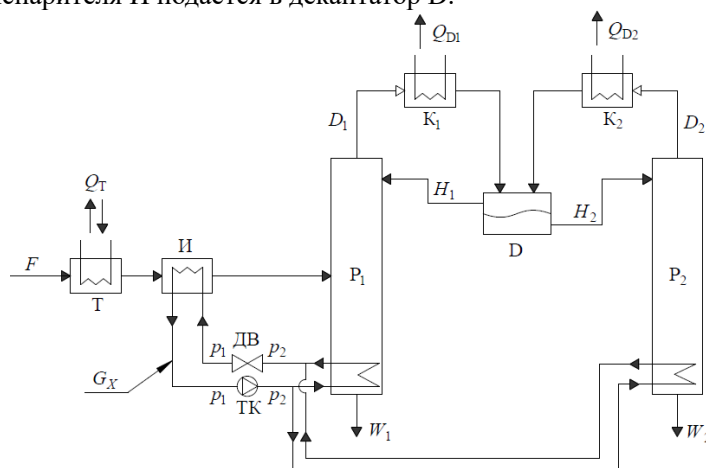


Рисунок 3 - Принципиальная схема разделения с использованием теплоты исходной смеси F для обогрева обеих колонн ($x_F < x_{H1}$, вариант В.2).

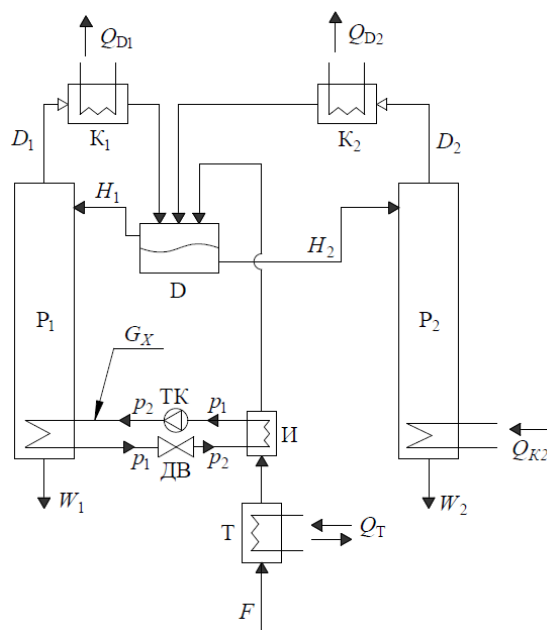


Рисунок 4 - Принципиальная схема разделения с использованием теплоты исходной смеси F для обогрева колонны P_1 ($x_{H1} < x_F < x_{H2}$, вариант В.3).

При составе исходной смеси $x_{H1} < x_F < x_{H2}$ теплота конденсации ее паров может также использоваться для обогрева колонны P_2 или же для обогрева обеих колонн. При составе исходной смеси, находящимся в диапазоне концентраций $x_F > x_{H2}$ первоначально ее подают на разделение в

колонну P_2 . При этом теплоту ее конденсации можно с применением теплового насоса использовать для испарения разделяемых смесей в колонне P_2 или же в обеих колоннах.

Для повышения энергоэффективности разделения гетероазеотропных смесей методом ректификации может оказаться применение двух тепловых насосов. Один из вариантов такого разделения показан на рис.5. В данном варианте разделения обогрев колонны P_1 производится за счет теплоты конденсации паров исходной смеси, а обогрев колонны P_2 осуществляется с использованием теплоты конденсации паров дистиллята D_2 .

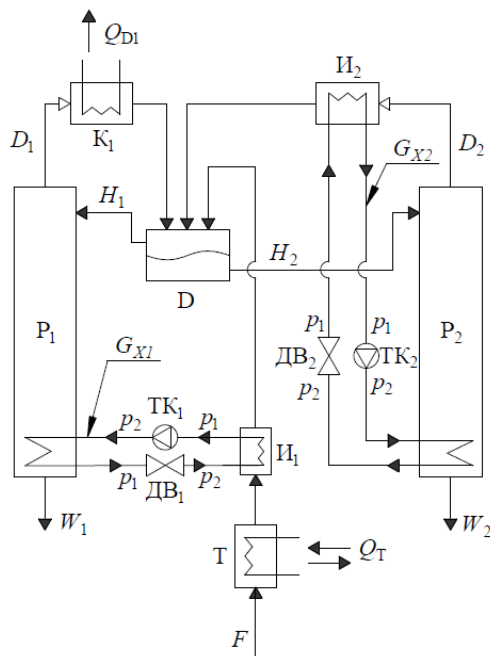


Рисунок 5 - Принципиальная схема разделения с использованием двух тепловых насосов ($x_{H1} < x_F < x_{H2}$, вариант В.4).

При оценке энергетической эффективности рассматриваемых вариантов разделения гетероазеотропных смесей нами были использованы известные уравнения для расчета материальных и тепловых потоков процесса ректификации [1]. Расход электроэнергии на привод компрессора теплового насоса определяли, используя следующую зависимость

$$N_K = \frac{F(i_2 - i_1)}{\eta}, \quad (1)$$

где i_1 и i_2 – энтальпия паров промежуточного теплоносителя при давлении p_1 и p_2 ; η – энергетический коэффициент полезного действия компрессора.

Выбор промежуточного теплоносителя, а также давлений p_1 и p_2 в контуре его циркуляции зависит от температур кипения компонентов разделяемых смесей [2,3].

На ряду с расчетами энергетических затрат нами была произведена оценка стоимости проведения процесса разделения с применением рассматриваемых вариантов. При этом для расчета затрат на обогрев кубов ректификационных колонн проводили, используя зависимость

$$C_{\Pi} = a_{\Pi}(Q_{K1} + Q_{K2}), \quad (2)$$

где Q_{K1} и Q_{K2} – расходы тепловой энергии, подводимой к кубам ректификационных колонн; a_{Π} – удельная стоимость паровой энергии.

Расчет затрат на конденсацию паров исходной смеси F , а также паров дистиллятов D_1 и D_2 проводили с использованием зависимости

$$C_B = a_B V_{\Sigma}, \quad (3)$$

где V_{Σ} – суммарный расход охлаждающей воды на конденсацию паровых потоков F , D_1 и D_2 ; a_B – удельная стоимость охлаждающей воды.

Стоимость электроэнергии, потребляемой компрессором теплового насоса, составляет

$$C_3 = a_3 N_K, \quad (4)$$

где N_K – мощность компрессора; $a_э$ – удельная стоимость электрической энергии
 При этом суммарную стоимость процесса разделения оценивали, используя выражение

$$C_{\Sigma} = C_{\Pi} + C_B + C_{\Sigma}. \quad (5)$$

Анализ энергетических затрат и стоимости разделения с использованием рассматриваемых вариантов проводился на примере разделения гетероазеотропных смесей вода – н-бутанол [7] и метанол – гексан [8]. Температура кипения исходных компонентов t_{K1} , t_{K2} и азеотропа t_A , составы азеотропа x_A , а также составы расслаивающихся жидких фаз x_{H1} и x_{H2} для указанных выше смесей приведены в таблице 1. Концентрацию выражали содержанием легколетучих компонентов (воды и метанола) в рассматриваемых смесях.

Таблица 1

Параметры рассматриваемых смесей при давлении 0,1 МПа						
Смесь	Температура, °С			Концентрация, %		
	t_{K1}	t_{K2}	t_A	x_{H1}	x_{H2}	x_A
Вода – н-бутанол	117,5	100,0	92,9	16,80	90,70	43,20
Метанол – гексан	68,0	64,7	49,7	5,42	73,30	27,50

При расчете материальных и тепловых потоков была принята производительность установки $F = 1000$ кг/ч. Состав кубовых остатков x_{W1} составлял 2 %, а состав кубовых остатков x_{W2} был равен 98 % (воды или метанола). Температуру паров исходной смеси t_F для смеси вода – н-бутанол принимали равной 120 °С, а для смеси метанол – гексан $t_F = 70$ °С. При анализе разделения используемых бинарных смесей в качестве промежуточного теплоносителя была выбрана вода. Для оценки стоимости разделения нами были приняты удельные показатели: греющий пар $a_{\Pi} = 3$ руб. за кВт·ч; стоимость электроэнергии $a_э = 7$ руб. за кВт·ч; стоимость охлаждающей воды $a_B = 20$ руб. за м³.

Расчет энергетических и стоимостных затрат для выбранных модельных смесей нами был произведен для всех рассматриваемых вариантов разделения с применением тепловых насосов. Результаты этих расчетов были сопоставлены с показателями разделения без использования тепловых насосов (варианты О.1 и О.2). В таблице 2 и 3 в качестве примера приведены стоимости разделения для рассматриваемых вариантов.

Таблица 2

Стоимость разделения смесей вода – н-бутанол для рассматриваемых вариантов						
$x_F, \%$	$C_{\Sigma}, \text{руб/ч}$					
	О.1	О.2	В.1	В.2	В.3	В.4
5,0	290,22	-	149,77	143,10	-	-
10,0	544,32	-	203,87	186,32	-	-
15,0	801,89	-	259,39	231,04	-	-
16,8	888,72	888,71	278,62	246,33	278,62	249,42
18,0	-	885,41	-	-	284,33	252,75
20,0	-	879,91	-	-	293,84	258,30
35,0	-	838,66	-	-	365,29	300,14
45,0	-	811,16	-	-	412,93	328,06
70,0	-	742,41	-	-	532,04	397,81
85,0	-	701,16	-	-	603,49	439,65
89,0	-	690,16	-	-	622,54	450,81
90,7	-	685,48	-	-	630,62	455,53

Таблица 3

Стоимость разделения смесей метанол – гексан для рассматриваемых вариантов

$x_F, \%$	$C_{\Sigma}, \text{руб/ч}$					
	O.1	O.2	B.1	B.2	B.3	B.4
2,50	116,36	-	74,82	73,18	-	-
3,50	150,28	-	82,68	77,80	-	-
4,50	182,42	-	90,41	82,29	-	-
5,42	211,07	211,09	97,51	86,42	97,50	87,67
10,00	-	228,18	-	-	120,21	97,21
20,00	-	265,49	-	-	169,79	118,03
30,00	-	302,80	-	-	219,37	138,85
40,00	-	340,11	-	-	268,94	159,67
50,00	-	377,41	-	-	318,52	180,48
60,00	-	414,72	-	-	368,10	201,30
70,00	-	452,03	-	-	417,68	222,12
73,30	-	464,34	-	-	434,03	228,99

Анализ полученных данных показал, что применение тепловых насосов позволяет существенно (иногда даже в два раза) снизить энергетические затраты и соответственно стоимость разделения. Наиболее экономичным из рассматриваемых вариантов оказался вариант В.4, в котором разделение осуществляется с применением двух тепловых насосов.

При анализе полученных данных было установлено, что на эффективность разделения рассматриваемых гетероазеотропных смесей определенное влияние оказывает состав разделяемой смеси. Это связано с тем, что при изменении состава исходных смесей происходят изменения материальных потоков. Это в свою очередь, приводит к изменениям энергетических и стоимостных затрат. Было также отмечено, что энергетические и стоимостные затраты при разделении водно-органических смесей существенно выше аналогичных затрат на разделение органических смесей. Это объясняется более высокими значениями теплоемкости и теплоты фазовых переходов водно-органических смесей.

Список литературы

1. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А. и др. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. М: Высшая школа, 2006, 1760 с.
2. Янговский Е.И., Левин Л.А. Промышленные тепловые насосы. М.: Энергоиздат, 1989, 128 с.
3. Амерханов Р.А. Тепловые насосы. М.: Энергоиздат, 2005, 160 с.
4. Уиннингтон Т.Л., Грин Р.Дж., Лортон Р., Юзелтон Р.Б. Абсорбционный тепловой насос и способ его работы. Интеротекс Лимитед, 2001, 126 с.
5. Захаров М.К., Носов Г.А., Мясоedenков В.М. Применение тепловых насосов в процессах химической технологии. Ученые записки МИТХТ им. М.В. Ломоносова, 2002. Вып. 6, с. 55-63.
6. Хоменков А.С., Ильина С.И. Энергосбережение в процессах ректификации с применением тепловых насосов. Успехи в химии и химической технологии, 2017, Т. 31, №5, с. 17-19.
7. Kato, M.; Konishi, H.; Hirata, M. J. New apparatus for isobaric dew and bubble point method methanol + water, ethyl acetate + ethanol, water + 1-butanol, and ethyl acetate + water systems. Chem. Eng. Data, 1970, v. 15, p. 435-439.
8. Zhang, L.; Chen, J.; Ding, J. Prediction of atmospheric VLE for the ternary system dimethyl carbonate – methanol – n-hexane. Jingxi Shiyu Huagong, 2003, v. 16, № 4, p. 42.

УДК: 547.672.1

Нуралие Ш.Б., Нурмонов С.Э.

Выделение полициклических ароматических углеводородов из побочных продуктов отходов пиролиза

Нуралиев Шухрат Бахтиёрович-докторант; shnuraliyev3112@gmail.com

Нурмонов Сувонкул Эрхонович- д.т.н., профессор кафедры;

УзМУ «Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека»,

Узбекистан, Ташкент, 100174, Алмазарский район, улица Университетская, дом 4

В данной научно-исследовательской работе на предприятии ООО «Uz-Kor Gas Chemical», построенном в Кунградском районе Республики Каракалпакстан, одним из остаточных продуктов переработки природного газа является переработка и фракционирование «Tar-Product», выделение из состава выделенных фракций трициклических ароматических углеводородов с растворителями: фенантрена, антрацена и их гомологов. Будет предоставлена информация о способе извлечения и очистки.

Ключевые слова: тар-продукт, антрацен, фенантрен, флуорен, 2-метилантрацен, 9-метилантрацен.

Isolation of polycyclic aromatic hydrocarbons from pyrolysis waste by-products

Nuralie Sh.B., Nurmonov S.E.

UzMU «National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek»,

Uzbekistan, Tashkent, 100174, Almazar district, University street, house 4

In this research work at the Uz-Kor Gas Chemical LLC enterprise, built in the Kungrat district of the Republic of Karakalpakstan, one of the residual products of natural gas processing is the processing and fractionation of “Tar-Product”, the separation of tricyclic aromatics from the isolated fractions hydrocarbons with solvents: phenanthrene, anthracene and their homologues. Information on extraction and cleaning methods will be provided.

Key words: tar product, anthracene, phenanthrene, fluorene, 2-methylantracene, 9-methylantracene.

Введение

Реформы Узбекистана в топливно-энергетической сфере (политика глубокой модернизации производственных мощностей, а также технического и технологического переоснащения) направлены на увеличение производства готовой продукции, ориентированной на экспорт, и повышение её конкурентоспособности на основе глубокой переработки углеводородного сырья [1].

Одним из таких предприятий является ООО «Uz-Kor Gas Chemical», построенное в Кунградском районе Республики Каракалпакстан. В результате переработки природного газа на данном предприятии образуется один из побочных продуктов – «Тар-продукт». Общая годовая производственная мощность комплекса составляет 387 тысяч тонн полиэтилена и 83 тысячи тонн полипропилена. Кроме того, в процессе переработки образуется более 102 тысяч тонн пиролизного дистиллята, 8 тысяч тонн пиролизного масла и 10 тысяч тонн тяжелой пиролизной смолы – «Тар-продукта» [2].

“Тар-продукт” – это стеклообразная, слегка хрупкая, твердая масса темно-коричневого цвета, которая плавится при 60–70 °С при нормальном атмосферном давлении и начинает кипеть при 270–280 °С. “Тар-продукт” хорошо растворяется в бензоле, толуоле, хлороформе, четыреххлористом углероде (углерод (IV)-хлориде), ДМСО, ДМФ и других растворителях. Основной состав “Тар-продукта” включает би-, три- и полициклические ароматические углеводороды (60–85%), а также смолы и асфальтены (10–15%). В настоящее время, из-за высокого содержания ароматических углеводородов, “Тар-продукт” широко используется в качестве сырья для производства сажи и технического углерода [3].

Природа и физико-химические свойства ароматических углеводородов в основном определяют выбор реагентов для экстракции. В таких экстракционных системах в качестве неполярной фазы используется алифатический углеводород, а вторая фаза представляет собой полярный органический экстрагент или его водный раствор [4].

Были изучены свойства растворения «Тар-продукта» в различных растворителях, что представлено в (таблице 1).

Таблица 1

Растворимость «Тар-продукта» в различных растворителях		
№	Растворителях	Уровень растворимости,%. 25±1 °С
1	Диметилформамид	72,4
2	Хлороформ	63,7
3	Ацетон	65
4	Метанол	67,6
5	Этилацетат	66,6

Экспериментальная часть

С целью выявления содержания антрацена, фенантрена и их гомологов, которые являются основой для многих биологически активных веществ, из «Тар-продукта» была выделена фракция с температурным интервалом 180–360 °С с использованием специального оборудования, изготовленного из коррозионностойкой стали. Выделенная фракция представляет собой темно-коричневую, густую массу темно-сигарного цвета, без неприятного запаха, с температурой кипения 180–200 °С, плотностью $\rho = 1,13$ г/мл, и при комнатной температуре сохраняет жидкое состояние.

Состав вторичного сырья, которое представляет собой «Тар-продукт», был изучен с использованием фракционирования при высоких температурах в вакууме, а полученные фракции были подвергнуты физико-химическому анализу.

Фракция, полученная в результате вакуумного фракционирования «Тар-продукта», была проанализирована с помощью хромато-масс-спектрометрического метода на устройстве GC-MSD 5977A фирмы Agilent Technologies (рис. 1). Результаты масс-спектрального анализа показали, что в состав полученной фракции входят несколько веществ, которые имеют ценность для промышленности. (Таблица 2).

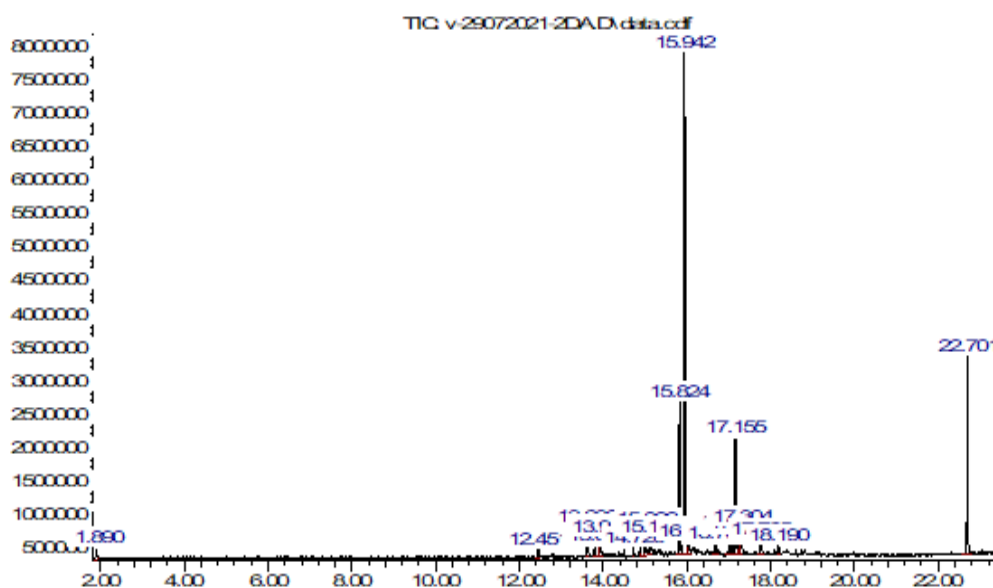


Рисунок 1 - Результаты вакуумного фракционирования «Тар-продукта»

Таблица 2

Состав фракции «Таг-продукта» при температуре 180–360 °С

№	Название вещества	Время выхода (мин)	Доля компонента (%)
1	Флуорен	13,63	2,17
2	9-метилфлуорен	14,95	2,86
3	Фенантрен	15,82	10,44
4	2-метилфенантрен	15,94	3,64
5	4-метилфенантрен	16,71	1,02
6	3-метилфенантрен	17,01	1,4
7	2-метилантрацен	17,07	1,79
8	Антрацен	17,16	8,69
9	9-метилантрацен	17,26	2,7
10	1-метилантрацен	17,30	2,09
11	1,2-бензендикарбоного кислота	22,70	13,46
12	Неопределённый продукт	>22,70	41,25

Для определения состава фракции «Таг-продукта» сначала из фракции 340–360 °С, выделенной методом перегонки, было взято 700 мл, затем 3–4 г перегонного вещества было добавлено в колбу объёмом 1000 мл, и она была помещена в перегонный аппарат (рис. 2). Температура постепенно увеличивалась на 10–15 °С в минуту, и фракционирование началось при температуре 180 °С. Для проведения этого процесса были выделены фракции 335–345 и 345–360 °С из основной фракции, и состав полученных образцов был проанализирован.

Начальная фракция состояла примерно на 55–60% из фенантрена, 38–43% из антрацена и 1–2% из флуоренда. Во второй фракции в основном были обнаружены гомологи антрацена и фенантрена.

Для отделения смеси антрацена и фенантрена из первой фракции использовался бензольный растворитель при температуре 7–10 °С (массовое соотношение смеси и растворителя 1:3–5). Из первой основной фракции, содержащей фенантрен, осаждается 80% кристаллов антрацена. На первом этапе процесса кристаллы растворяются в холодном бензоле. В насыщенный раствор добавляется вода (в количестве, составляющем 20–30% от массы растворителя). В результате образуется 95% кристаллов антрацена, которые затем отделяются от жидкости. Полученные кристаллы (составляющие 30–32% основной фракции) являются антраценом, который отделяется от жидкости и возвращается на первый этап процесса, где объединяется с 80% антрацена, полученного при первоначальной обогащении смеси антрацена и фенантрена, в результате чего выделяется 93–95% чистых кристаллов антрацена, составляющих 38–42% основной фракции.

На втором этапе процесса для отделения обогащённого фенантрена жидкость, из которой были выделены кристаллы антрацена, смешивается и обрабатывается в соотношении 1:1 с водой и толуолом. Образуется 96,5% кристаллов фенантрена, которые затем отделяются от растворителя методом перегонки. Полученный образец был проанализирован с помощью ИК-спектроскопии (рис. 3).

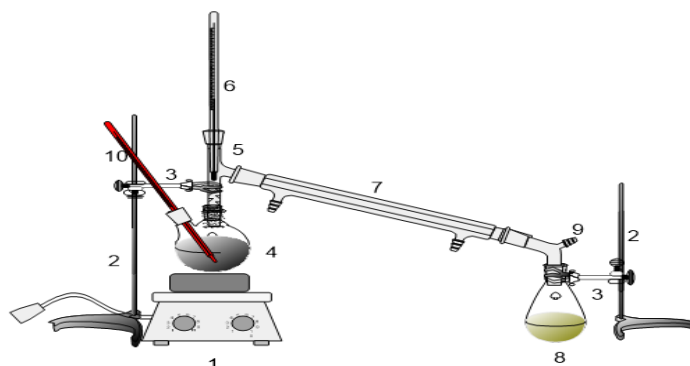


Рисунок 2 - Ректификационная перегонная установка. 1 - печь для нагрева, 2 - штатив, 3 - зажим, 4 - перегонная колба, 5 - переходник с дефлегматором, 6 - термометр, 7 - охладитель, 8 - сборная колба, 9 - алонж, 10 - капилляр.

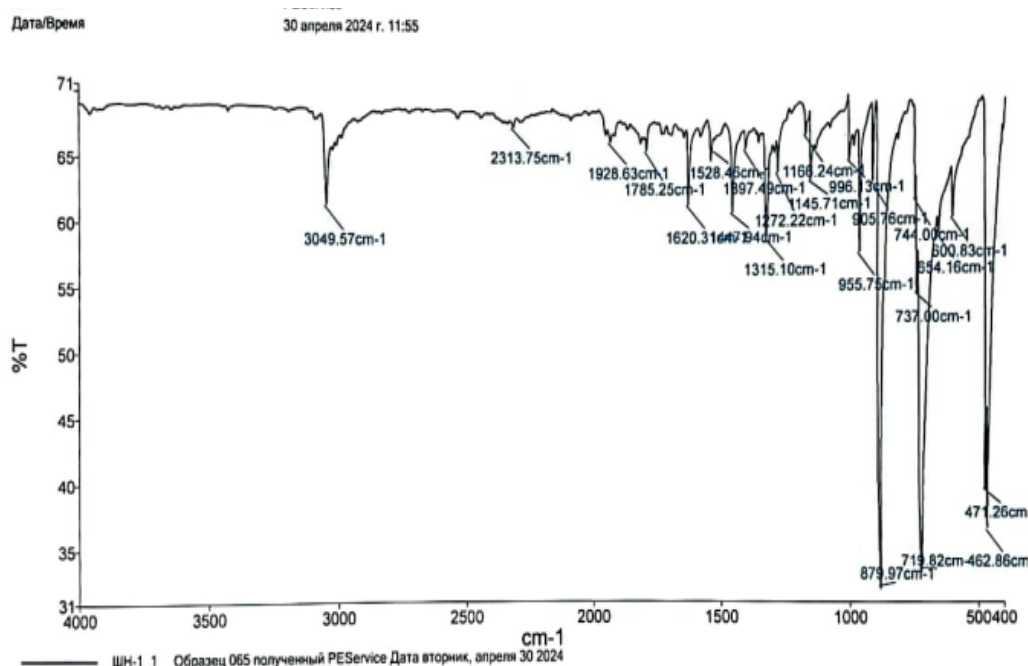


Рисунок 3 - ИК-спектр антрацена.

При анализе полученного ИК-спектра колебания валентных связей на $3049,57\text{ см}^{-1}$ указывают на наличие связи С-Н в ароматическом кольце, а колебания в диапазоне $1620\text{--}1528\text{ см}^{-1}$ подтверждают наличие самого ароматического кольца.

Для выделения гомологов антрацена и фенантрена из тар-продукта была повторно обработана фракция с температурой кипения $345\text{--}360\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для выделения 2-метилантрацена было установлено, что он хорошо растворяется в этиловом спирте, поэтому процесс был проведен с использованием технического этанола.

Сначала сырье нагревали в промышленном этаноле, после растворения смесь оставляли охлаждаться до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, затем фильтровали. Далее фильтрат продолжали охлаждать до комнатной температуры и снова фильтровали. Осадок обрабатывали 10%-ным раствором серной кислоты до достижения pH 2-3, затем добавляли 10%-ный раствор гидроксида натрия до достижения pH 7-8 и снова фильтровали. Полученные кристаллы перекристаллизовывали из пиридина или продолжали перекристаллизацию из этанола. В результате были получены кристаллы 2-метилантрацена с температурой плавления $200,5\text{--}203\text{ }^{\circ}\text{C}$. Далее 2-метилантрацен очищали путем перегонки из спирта, и полученный образец был проанализирован методом ИК-спектроскопии (рис. 4).

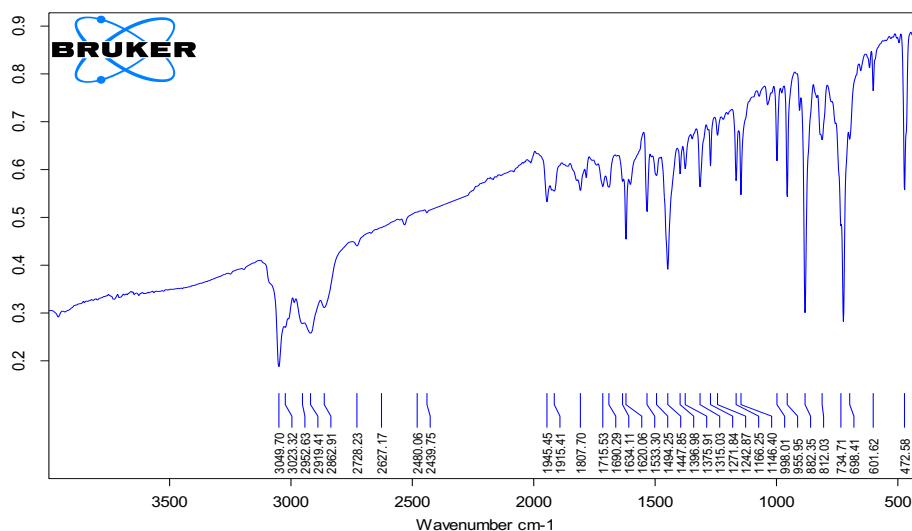


Рисунок 4 - ИК-спектр метилантрацена

При анализе полученного ИК-спектра колебания валентных связей на 3050 см^{-1} указывают на наличие связи С-Н в ароматическом кольце, колебания в диапазоне $2918\text{--}2862\text{ см}^{-1}$ свидетельствуют о наличии метильной группы (CH_3) в молекуле, а колебания на $1620\text{--}1533\text{--}1494\text{--}1447\text{ см}^{-1}$ подтверждают наличие ароматического кольца.

Заключение

В заключение можно сказать, что в ходе пиролиза углеводородов на предприятии ООО «Uz-Kor Gas Chemical» образуется вторичный продукт – тар-продукт, который был исследован с использованием различных современных методов анализа. Установлено, что тар-продукт представляет собой смесь, содержащую антрацен, фенантрен и их гомологи, обладающие ценными свойствами. Также было изучено, что переработка тар-продукта позволяет синтезировать продукцию, которая в настоящее время импортируется в нашу страну, а также может быть ориентирована на экспорт.

Список литературы

1. G'aybullayev, S. A. (2024). Uglevodorodlar Pirolizi Jarayonining Kinetikasi. Journal Of Multidisciplinary Bulletin, 7(1), 137-142.
2. Oficialniy sayt SP ООО "Uz-Kor Gas Chemical" <http://www.uz-kor.com/index.php/ru/deyatelnost> 2018 g.
3. Кодиров О. Ш., Мирзакулов Х. Ч., Бердиев Х. У., & Шарипова В. В. // Исследование химического состава пироконденсата пиролизного производства. Universum: технические науки, (9 (54)), 59-64.
4. Gritsok, Dmitrij. (2020). Extraction of Polyaromatic Hydrocarbons and Their Derivatives by Solutions of Organic Salts in Methyl Alcohol. 24-b 10.13140/RG.2.2.34070.22080.
5. Nurmonov S.E., G'oyipov A.R., Nuraliyev Sh.B., Uglevodorodlar pirolizi chiqindisi tarkibidan antrasen olish va xossalarini o'rganish. Namangan muxandislik- qurulish institute. Mexanika va texnologiya ilmiy jurnal. 1(4), 2023. Maxsus son. 166-170 betlar.

Нуриллаева А.А., Рахмонова М.И., Бекбаева Ф.У., Мавлонов Э.Т., Нурмухамедов Х.С.
Теплопередачи в ректификационной колонне с трубчато-решетчатыми тарелками

Нуриллаева А.А.- аспирант, anuryllaeva@mail.ru ;

Рахмонова М.И.-соискатель;

Бекбаева Ф.У.- ассистент кафедры ТМО;

Мавлонов Э.Т. - PhD, доцент кафедры ТМО;

Нурмухамедов Х.С. - д.т.н., проф. кафедры ТМО;

Ташкентский химико-технологический институт; Узбекистан, Ташкент, ул.Мирзо Улугбек, дом-41.

В тезисе рассмотрены процесс ректификации как один из наиболее сложных массообменных процессов, требующих детального анализа физических и химических закономерностей. Описаны основные условия эффективного протекания процесса, включая контакт паровой и жидкой фаз в неравновесном состоянии, что обеспечивает интенсивный тепломассообмен. Рассмотрены различные конструкции ректификационных колонн и контактных устройств, таких как ситчатые, провальные и колпачковые тарелки, а также насадочные колонны, их эффективность и область применения. Особое внимание уделено интенсификации конвективного теплообмена, что является актуальной задачей при высоких и низких числах Рейнольдса. Обсуждаются проблемы, связанные с высокой металлоемкостью и энергопотреблением массообменных колонн, а также пути их модернизации. Приведены примеры улучшения эффективности колонн за счет использования современных контактных устройств, что позволяет существенно снизить расход греющих и охлаждающих агентов. Оптимизация размеров и режимов работы колонн рассматривается как перспективное направление, позволяющее снизить энергозатраты без значительных капитальных вложений. В статье анализируются теоретические и практические аспекты повышения эффективности ректификационных процессов. В статье предложена экспериментальная установка для изучения теплообмена в трубчатом пакете с гладкими трубками и трубками со спиральевидными турбулизаторами. Исследования показали, что коэффициент теплопередачи зависит от скорости потока и шага расположения турбулизаторов. Конструкция с турбулизаторами оказалась более эффективной по сравнению с гладкими трубами, с интенсификацией теплопередачи до 1,8 раза.

Применение данных труб в колонных аппаратах позволяет выравнивать температуру по высоте колонн и повышать эффективность массообменных процессов, что положительно влияет на массогабаритные параметры аппаратов в химической и перерабатывающей промышленности.

Ключевые слова: ректификация, массообмен, контактные устройства, теплообмен, интенсификация, модернизация.

Heat transfer in a rectification column with tubular lattice plates

Nurillaeva A.A.¹, Rakhmonova M.I.¹, Bekbaeva F.U.², Mavlonov E.T.², Nurmukhamedov Kh.S.²

^{1,2} Tashkent Institute of Chemical Technology, Tashkent, Uzbekistan.

The theses discusses the process of rectification as one of the most complex mass transfer processes requiring a detailed analysis of physical and chemical laws. The main conditions for the efficient process are described, including the contact of the vapor and liquid phases in a nonequilibrium state, which ensures intensive heat and mass transfer. Various designs of rectification columns and contact devices, such as sieve, dip and cap trays, as well as packed columns, their efficiency and scope of application are considered. Particular attention is paid to the intensification of convective heat transfer, which is an urgent task at high and low Reynolds numbers. Problems associated with high metal consumption and energy consumption of mass transfer columns, as well as ways of their modernization are discussed. Examples of improving the efficiency of columns due to the use of modern contact devices are given, which allows to significantly reduce the consumption of heating and cooling agents. Optimization of the size and operating modes of columns is considered as a promising direction that allows to reduce energy costs without significant capital investments. The article analyzes theoretical and practical aspects of increasing the efficiency of rectification processes. The article proposes an experimental setup for studying heat exchange in a tubular package with smooth tubes and tubes with spiral turbulators. Studies have shown that the heat transfer coefficient depends on the flow rate and the pitch of the turbulators. The design with turbulators turned out to be more effective than smooth tubes, with heat transfer intensification up to 1.8 times. The use of these tubes in column apparatuses allows equalizing the temperature along the height of the columns and increasing the efficiency of mass-

exchange processes, which has a positive effect on the mass-dimensional parameters of apparatuses in the chemical and processing industries.

Key words: rectification, mass transfer, contact devices, heat exchange, intensification, modernization.

Введение

Процесс ректификации по своим физико-химическим свойствам и методам расчета относится к одному из наиболее сложных массообменных процессов. Поэтому, прежде чем приступить к выполнению расчетов, рекомендуется на основе глубоких знаний в области теории процесса ректификации, уделяя при этом особое внимание физическому смыслу не только основных закономерностей, но и отдельных параметров процесса.

Основным условием для эффективной организации процесса ректификации является то, что паровая и жидкая фазы до вступления в контакт между собой должны находиться в неравновесном состоянии. Так как давление для фаз остается одинаковым постоянным, то, следовательно, температуры фаз должны быть разными. В условиях контакта помимо массообмена между фазами происходит и теплообмен: температура пара выше температуры жидкости, следовательно, пар конденсируется и отдает свое тепло жидкости, которая в свою очередь испаряется. В результате такого тепломассообмена образующийся пар обогащается низкикипящим компонентом, а жидкость - высококипящим компонентом. Вследствие того, что система стремится к равновесию, то температуры образующихся паров и жидкости выравниваются [1, 2].

Интенсивный контакт паров и жидкости на практике осуществляются в ректификационных колоннах, объем которых заполнен контактными устройствами для формирования развитой поверхности контакта фаз. Как правило, ректификационные колонны действуют по принципу противотока в целом по всему аппарату, в то время как на каждом отдельном участке формирования поверхности контакта фаз, схемы взаимодействия фаз могут быть самыми разнообразными.

Ситчатые тарелки имеют достаточно высокую эффективность, малое гидравлическое сопротивление и низкую металлоемкость. Они применяются преимущественно в колоннах, работающих при атмосферном давлении и под вакуумом; во избежание забивки отверстий рекомендуется использовать чистые жидкости [1, 3, 4].

Провальные тарелки решетчатого типа имеют производительность, в 1,5-2 раза больше, чем колпачковые тарелки и низкую металлоемкость. Их эффективность достаточно высока, но они работают в узком диапазоне рабочих скоростей. Тарелки данного типа рекомендуется применять при больших нагрузках колонны по жидкой фазе [1, 3].

Колонные аппараты с насадками в основном используются для перегонки высоко агрессивных или вязких продуктов, а также когда возникает необходимость иметь малый запас жидкости в процессе ректификации, не требующих тонкого разделения, и в процессах абсорбции с большими удельными нагревателями по жидкости для равномерного распределения жидкости по поверхности насадки.

В настоящее время интенсификация конвективного теплообмена является одной из перспективных и сложных проблем теории переноса. Традиционно считается, что эта задача наиболее актуальна для теплоносителей, которым присущи высокие значения чисел Рейнольдса. Практически все основополагающие монографии на тему интенсификации конвективного теплообмена [5] посвящены этой проблеме применительно именно к большим числам Re и лишь немногие - при ламинарном течении [6].

Однако элементарные объемы жидкости, перемещаясь по сложным траекториям в пристенной области, могут переносить теплоту более эффективно, чем количество движения из-за различий в распределении полей температуры и вектора скорости. Очевидно, что такая ситуация может возникнуть как результат интенсифицирующего воздействия на процесс теплообмена, как следствие свойств жидкости или как совместный результат того и другого.

В основе теплогидравлического расчета таких каналов – эмпирические и полуэмпирические соотношения, имеющие ограниченную область применения. Однако существует дефицит даже этих опытных формул.

Массообменные колонны имеют сложную конструкцию, большую металлоемкость и повышенный расход энергии в виде греющих (чаще всего водяной пар) и охлаждающих агентов (чаще всего вода). Расход энергии в значительной мере зависит от совершенства аппаратного оформления, т.е. эффективности используемых контактных устройств в колоннах. Из теории и практики ректификации известно, что чем ниже эффективность контактных устройств, тем больший расход флегмы (флегмовое число) требуется, следовательно, повышается расход греющего агента в кипятильнике колонны и охлаждающего в дефлегматоре. Известны примеры модернизации

ректификационных колонн, обеспечивающей снижение расхода теплоносителей в два раза даже при работе с нагрузкой, на 30% превышающей проектную [7, 8, 9]. Модернизация заключается в оптимизации размеров и режима работы колонн при использовании высокоэффективных контактных устройств взамен устаревших. Данное направление имеет значительные перспективы, т.к. позволяет с помощью небольших капитальных вложений и в сжатые сроки добиться существенного снижения энергозатрат на единицу продукции.

В целях интенсификации конвективного теплообмена в трубчато-решетчатых тарелках использованы трубы со спиралевидными турбулизаторами, которые в отличие от других видов турбулизаторов (кроме витых, спирально-накатанных и со спиральными вставками) имеют дополнительно вращательную составляющую потока жидкости.

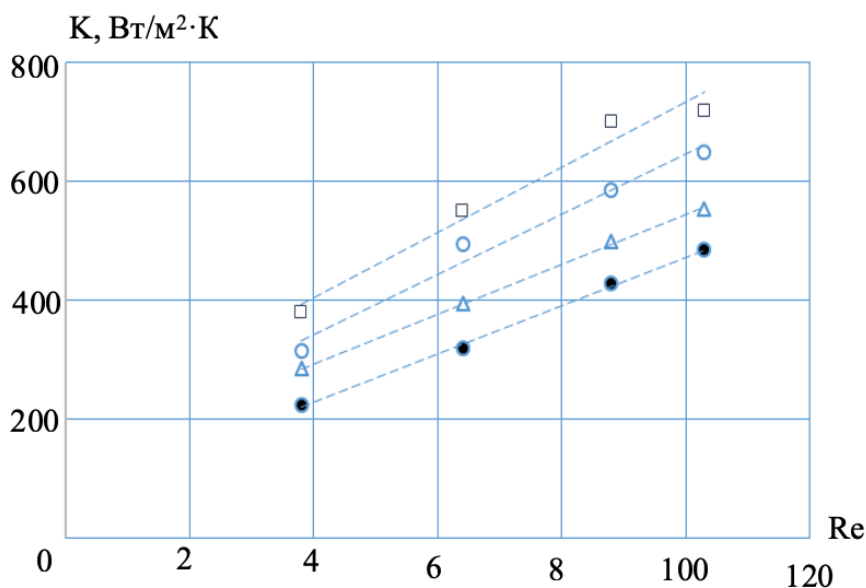
Экспериментальная часть

Экспериментальная установка для исследования теплообмена трубчатого пакета представляет собой цилиндрический корпус диаметром 0,25 м. Конструкция трубчато-решетчатой тарелки выполнена в виде пакета труб из гладких труб и труб со спиралевидными турбулизаторами. Причем, шаг навивки спиралевидных турбулизаторов равен $s/d=5,11-14,2$, а шаг расположения труб изменялся в пределах $t/d=1,15-3,0$. Скорость потоков изменялась в диапазоне чисел Рейнольдса $Re=3500-340000$, а температура теплоносителей на входе и выходе из экспериментального аппарата. Также измерялась температура стенки трубы при помощи хромель-копелевых термопар.

На рис.1 приводятся результаты экспериментального исследования по влиянию скорости потока Re_1 на коэффициента теплопередачи K при шахматном размещении труб в трубной доске. Шаг расположения труб в трубной решетке $t/d_{3,6}=1,1$. Анализ графического изображения конвективного теплопереноса показывает, зависимость $K=f(Re)$ имеет восходящий характер при всех шагах расположения дискретно расположенных турбулизаторов. В повышение значений коэффициента теплопередачи существенное влияние оказывает шаг расположения спиралевидных турбулизаторов $s/d_{3,6}$. Влияние шага расположения турбулизаторов можно рассмотреть на следующем примере: при скорости потока $Re=88$ и шаге расположения спиралевидных турбулизаторов $s/d_{3,6}=14,2$ значение коэффициента теплопередачи равно $K=500$, при $s/d_{3,6}=9,32$ величина коэффициента $K=585$ и при $s/d_{3,6}=5,11$ – соответственно $K=700$ Вт/м²·К (рис.1а).

Сравнение полученных данных по коэффициенту теплопередачи трубчато-решетчатых тарелок из гладких труб и из труб со спиралевидными турбулизаторами показали эффективность второй конструкции.

Характер функциональной зависимости $K=f(Re)$ при шахматном размещении труб с шагом расположения труб в трубной доске $t/d_{3,6}=1,3$ (рис.1б) аналогичен с шагом $t/d_{3,6}$. Разница только в численных значениях коэффициента теплопередачи. Так, например, при скорости потока $Re=88$ и шаге расположения спиралевидных турбулизаторов $s/d_{3,6}=14,2$ величина коэффициента равна $K=301$, при $s/d_{3,6}=9,32$ значение коэффициента $K=330$ и при $s/d_{3,6}=5,11$ – соответственно $K=390$ Вт/м²·К (рис.1б).



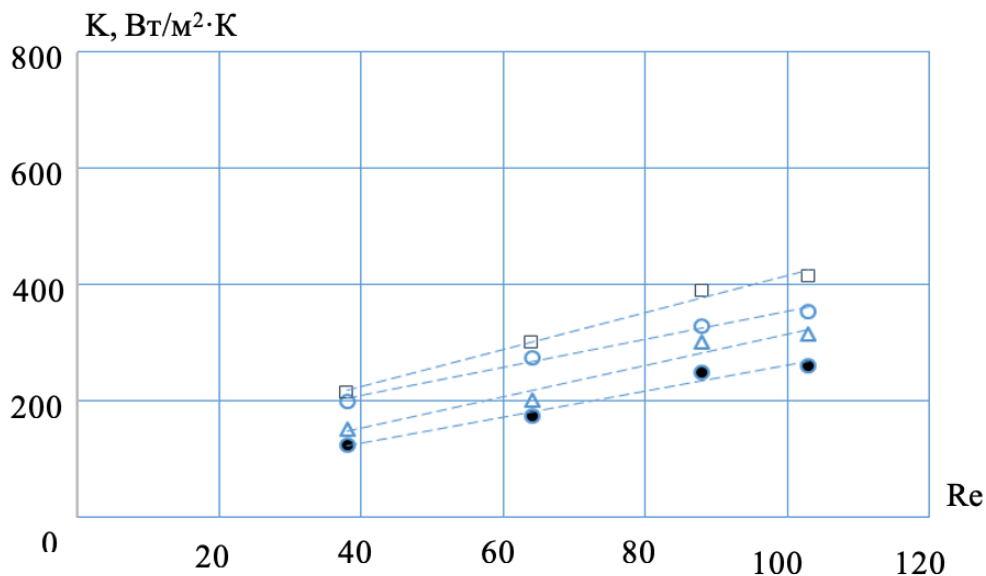


Рисунок 1 - Зависимость коэффициента теплопередачи K от скорости жидкости Re при шаге размещения труб $t/d_{э.б.}=1,1$ (а) и $t/d_{э.б.}=1,3$ (б).

Шахматное расположение труб.

● - гладкая труба; □ - $s/d_{эб}=5,11$; ○ - $s/d_{эб}=9,32$; Δ - $s/d_{эб}=14,2$.

Сопоставление экспериментальных результатов по теплопередаче на трубчато-решетчатых тарелках из труб со спиралевидными турбулизаторами при шахматном расположении труб с различным шагом $t/d_{э.б.}$ показало, что численные величины по коэффициенту теплопередачи K для шага расположения $t/d_{э.б.}=1,1$ значительно превышает данные полученные для шага расположения $t/d_{э.б.}=1,3$.

Из анализа рисунков 1а и 1б выявлено, что при шаге $t/d_{эб}=1,1$ при шахматном размещении труб с турбулизаторами, интенсификация теплопередачи составляет 1,6-1,8 раза относительно данных при шаге $t/d_{эб}=1,3$ в зависимости от шага навивки спиралевидных турбулизаторов.

Закключение

Несмотря на значительную долю теплообменных аппаратов и устройств на предприятиях химической, газо- и нефтеперерабатывающих, пищевой и др. промышленности, к.п.д. этих аппаратов невысок В настоящей работе улучшены теплогидравлические параметры теплообменного устройства для колонных аппаратов путем использования труб в трубчато-решетчатых тарелках трубы со спиралевидными турбулизаторами.

Применение в трубчато-решетчатых насадках труб со спиралевидными турбулизаторами в укрепляющей части ректификационных колонн вместо нескольких тарелок позволяет выровнить температуру по всей высоте колонного аппарата. Следует отметить, что столь высокая эффективность получена при течении горячего потока в переходном режиме движения.

Улучшение переноса тепла в трубчато-решетчатых тарелках позволяет повысить эффективность массообменного процесса при ректификации. Существенное увеличение тепломассообменных процессов положительно отразится в массогабаритных параметрах колонных аппаратов.

Список литературы

1. Александров И.А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. Методы расчета и основы конструирования. – М.: Химия, 1978. – 280 с.
2. Гусев В.П., Гусева Ж.А., Риффель В.Р. Основы теории, технологический, конструктивный и гидравлический расчеты ректификационных колонн. - Томск: изд-во ТПУ, 2008. – 62 с.
3. Рамм И.А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. – М.: Химия, 1978. – 277 с.
4. Нурмухамедов Х.С., Юсупбеков Н.Р., Темиров О.Ш. ва б. Газларни кайта ишлаш технологияси, жараён ва курилмалари. – Т.: Шарк, 2016.- 856 б.
5. Дзюбенко Б. В. и др. Интенсификация тепло-и массообмена в энергетике //М.: ФГУП «ЦНИИАТОМ-ИНФОРМ. – 2003.

6. Назмеев Ю.Г., Лавыгин В.М. Теплообменные аппараты ТЭС: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2002.-256 с.
7. Башаров М.М. Энергоресурсосберегающая модернизация теплоиспользующих установок в производстве фенола / Автореф.дис...к.т.н. – Казан. гос. энерг. ун-т, 2011.-16 с.
8. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Минеев Н.Г. Повышение эффективности ректификационных колонн в производстве этаноламинов // Химическая промышленность. – 2007. – № 7. – С. 354-360.
9. Ахметов Р.Н., Лаптев А.Г. Математическое моделирование теплоотдачи при поперечном обтекании пучков труб // Проблемы энергетики. – 2009. - №3-4. – с.141-145.

УДК 66.011

Платонов А.С., Хасанов К.Ф., Ерохина В.А., Закирова А.Ш.

Рекомендательная система на базе оптимизированных цифровых двойников

Платонов Александр Сергеевич – аспирант; sansplat@gmail.com.

Хасанов Камилль Фаридович – аспирант;

Ерохина Валерия Александровна – бакалавр;

Закирова Алия Шамилевна – бакалавр.

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»,
Россия, Республика Татарстан, Казань, 420015, ул. Большая Красная, д. 55.

В тезисах рассмотрены вопросы построения цифровых двойников и возможности оптимизации работы технологических установок при создании расчетных моделей оборудования. Общеизвестно, что цифровой двойник установки, может создаваться как на исключительно исторических данных, так и с включением физических моделей. Качество итогового двойника прямо зависит от качества и достоверности исходных данных. В нефтехимической отрасли остро встает вопрос прогнозирования работы наиболее универсальных установок - ректификационных колонн. Цифровой двойник, созданный на основе данных математического расчета, позволит проводить предиктивный анализ работы данных колонн, а также выдавать рекомендации эксплуатирующему персоналу по выведению параметров до оптимального уровня при изменениях режима работы установки в целях достижения максимальных результатов.

Ключевые слова: цифровой двойник, оптимизация, расчет технологического оборудования, ректификационные колонны, массообменные процессы, контактные устройства.

Recommendation system based on optimized digital twins

Platonov A.S., Hasanov K.F., Erohina E.A.¹

¹ Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation

The theses discusses issues of constructing digital twins and the possibility of optimizing the operation of process units when creating calculation models of equipment.

Key words: digital twin, optimization, calculation of process equipment, rectification columns, mass transfer processes, contact devices.

Введение

В современных нефтехимической и нефтеперерабатывающей отраслях промышленности выделяют три ключевых направления развития. Первое направление ориентировано на углубленную переработку сырья и утилизацию углеводородсодержащих отходов [1-5], второе – связано с активным вовлечением возобновляемых энергетических и сырьевых ресурсов [6, 7], третье – нацелено на оптимизацию существующих установок с целью снижения издержек и потерь, в том числе за счет создания цифровых моделей прогнозирования поведения объектов и самих технологических процессов [8, 9].

Прогнозирование работы будущей установки начинается на этапе предпроектной проработки и определения мощности нового производства, при последующих этапах проектирования характеристики процесса дополняются и обновляются по степени готовности к финальному варианту проекта. После строительства и проведения пуска установки действительные параметры процесса могут отличаться от проектных значений в связи с несовершенством физических моделей и сложностью описываемых процессов, поэтому действительные характеристики работы оборудования подбираются по месту эксплуатации в границах технологического регламента для недопущения выхода из строя аппаратов и технических средств [10].

Цифровой двойник установки, в общем понимании, зарождается на стадии проекта и продолжает совершенствоваться и уточняться до полноценного вывода в работу [11]. Применение автоматизированных систем контроля и управления технологическим процессом позволило упростить сбор данных и осуществить управление процессом в удаленном режиме из безопасного места. Внедрение цифровых технологий в структуры управления технологическим процессом в нефтегазохимической, металлургической, пищевой и других отраслях промышленности способствовал снижению эксплуатационных затрат, повышению культуры производства и безопасности на опасных для здоровья и жизни персонала объектах [12].

Для описания работы установки разрабатываются цифровые двойники, используя базу накопленных за годы эксплуатации данных в качестве основы для формирования кривых,

описывающих изменение производственного процесса во времени [13]. Имеющийся массив данных используется для создания многопараметрических контроллеров для автоматизации работы установки с применением систем усовершенствованного управления, обучения нейронных сетей для предсказания качественных и количественных параметров работы установки при изменении условий эксплуатации в пределах эксплуатационных данных. Цифровой двойник установки может создаваться как исключительно на исторических данных, так и с включением физических моделей [14]. Качество итогового двойника прямо зависит от качества и достоверности исходных данных, что приводит к недостаткам данного метода, таким как: чувствительность к изменению технологического режима, замене части оборудования, смена мощности производства, качества конечного продукта; дестабилизацию модели при наличии неадекватных значений данных аналитического контроля и иных параметров технологического процесса, содержащихся в массиве исторических данных, и подверженных неточности получаемых результатов от человеческого фактора или точности прибора измерения. Нейронное моделирование [15] дает возможность воспроизводить достаточно сложные зависимости за короткие сроки для сложных зависимостей по своей природе, как было представлено в работе [16]. Таким образом, метод нейронных сетей позволяет получить адекватную модель для оптимизации процесса [17]. Подход, при котором для создания цифрового двойника используется только физическая модель, не позволяет в достаточной степени описывать работу действующей установки, поскольку часто данные, полученные расчетным методом, расходятся с фактическими за счет наличия упрощений при расчетах оборудования и несовершенства применяемых физических моделей. В связи с многомерностью функции цели оптимальный расчет процессов и аппаратов для ректификации и абсорбции в общей постановке является чрезвычайно сложной задачей [18, 19].

Использование цифровых двойников позволяет оптимизировать процессы за счет определения промежуточных параметров и многофакторного анализа, однако задачи повышения и снижения производительности с целью увеличения выхода целевых продуктов или уменьшения энергозатрат, в зависимости от стоимости энергоресурсов и конечных продуктов, вызывают сложности. Из-за ограниченного набора эксплуатационных данных в модели установки отсутствуют требуемый набор переменных, характеризующий переходные режимы, а также состояния, приближенные к границе регламентных значений, что приводит к непредсказуемому поведению двойника и выдаче неадекватных результатов моделирования работы установки. Результаты работы нейронной сети, действующих по предиктивным алгоритмам нечеткой логики, формируют собой суррогатную модель без построения ясной и понятной структуры получения конечных значений. На рис. 1 принципиально изображена нейронная сеть, которая представляет собой ряд операторов (скрытые слои), содержащих определенную функцию для преобразования входного значения в соответствии с логическим весом входного сигнала в значение функции. При обучении нейронной сети происходит многократное сравнение выходных данных с ожидаемыми значениями, со временем наблюдается обобщение одних исходных данных и отдача предпочтения другим, более приоритетным.

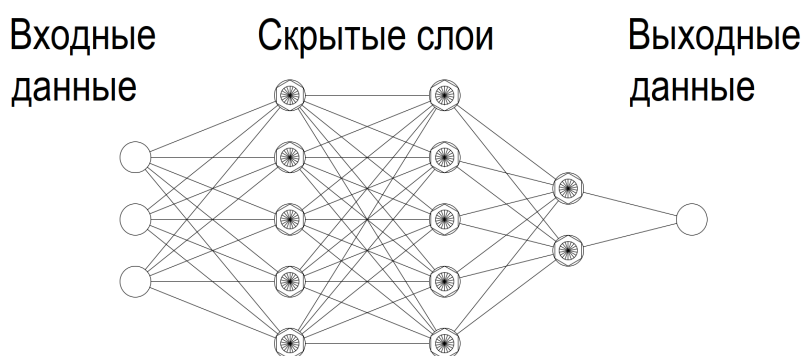


Рисунок 1 - Принципиальная схема нейронной сети

Предлагается организация цифрового двойника на результатах оптимизационных расчетов действующего оборудования. Собранные исторические данные используются для создания физических моделей и внесения корректировок для доведения расчетов до состояния, детально описывающих текущее состояние оборудования или установки с учетом ограничений, таких как загрязнение трубных решеток теплообменных аппаратов минеральными образованиями или отложениями биологического происхождения вследствие низких скорости течения и качества

очистки оборотной воды. Оптимизация работы заключается в определении «узких» мест установки, препятствующих выходу на проектные мощности, в повышении качества продукции, увеличении количества выпускаемых продуктов, а также в снижении потребления электроэнергии и вспомогательных потоков энергоресурсов. В процессе математического моделирования есть возможность просчитать режимы на оптимальные условия протекания процесса с учетом требований технологического регламента, технической возможности оборудования и готовности к оптимизации без вмешательства в работу установки и модернизации аппаратов. Например, для достижения максимальных показателей производительности ректификационных колонн производятся расчеты с определением максимально допустимого уровня заполнения переливных стаканов для недопущения состояния захлебывания клапанных тарелок с контролем скорости перетока жидкости через сливной зазор контактных устройств. Для этого требуется изучить геометрию внутренних контактных устройств, выявить действительный коэффициент полезного действия, который характеризует эффективность массообменных процессов на реальных тарелках при возможном загрязнении или наличии других неявных дефектов оборудования, способных образоваться в течении промышленной эксплуатации установки. Без проведения расчетов оборудования и построении модели установки на исторических данных такая оптимизация представляется невозможной из-за отсутствия производственного опыта работы в новых условиях. В нефтехимической отрасли остро встает вопрос прогнозирования работы наиболее универсальных установок - ректификационных колонн [20-22]

Экспериментальная часть

В ходе исследований были проведены расчеты ректификационной колонны выделения этан-этиленовой фракции с применением современного программного комплекса. Принципиальная схема колонны приведена на рис. 2.

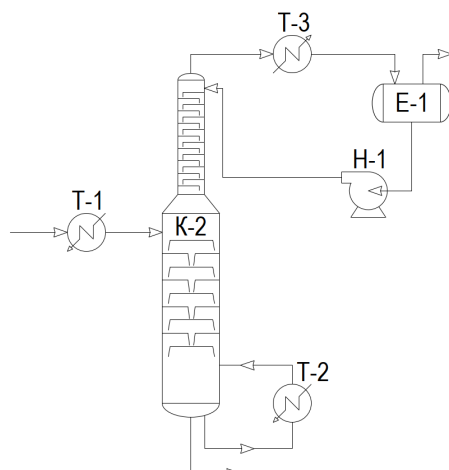


Рисунок 2 - Принципиальная схема колонны выделения этан-этиленовой фракции: K-2 – колонна выделения этан-этиленовой фракции; T-1 – теплообменник; T-2 – кипятильник; T-3 – холодильник; E-1 – рефлюксная емкость; H-1 – насос орошения

В колонне поз. K-2 происходит отделение этан-этиленовой фракции от более тяжелых углеводородов. Поток углеводородов, предварительно нагреваясь в теплообменнике поз. T-1, подается на тарелку питания колонны поз. K-2. Пары этан-этилена сверху колонны поз. K-2 поступают в трубное пространство дефлегматора поз. T-3, где охлаждаются и частично конденсируются за счет охлаждения пропиленом-хладоагентом, подаваемым в межтрубное пространство дефлегматора. Газожидкостная смесь из поз. T-3 поступает во флегмовую емкость поз. E-1. Жидкая фаза из поз. E-1 насосом поз. H-1 подается на верхнюю тарелку колонны поз. K-2 в качестве флегмы. Газообразная (этан-этиленовая) фракция из поз. E-1 подается на следующую установку.

Жидкость, стекающая в куб колонны, поступает в трубное пространство кипятильника поз. T-2, где нагревается водяным паром, подаваемым в межтрубное пространство кипятильника. Избыток кубовой жидкости этановой колонны поз. K-2 направляется на следующую установку выделения пропан-пропиленовой фракции.

Расчет проводился с учетом габаритных размеров, конструкции колонны, внутренних контактных устройств, вспомогательного оборудования и режима работы установки. Контролируя

величину среднеквадратичной ошибки результатов расчета от параметров ведения процесса формирования математической модели обнаружены состояния колонны, позволяющие увеличить производительность колонны без изменения конструкции колонны, типа контактных устройств [9]. Оптимизационный цифровой двойник, созданный на основе данных математического расчета, позволит проводить предиктивный анализ работы колонны, а также выдавать рекомендации эксплуатирующему персоналу рекомендации по выведению параметров до оптимального уровня при изменениях режима работы установки в целях достижения максимальных результатов.

Заключение

Метод создания цифровых двойников с использованием смешанного подхода моделирования процесса совмещает достоинства эмпирического и математического методов, такие как адекватность модели и сниженная чувствительность к смене режима работы установки. Полученные данные позволяют определить ограничения технологического процесса и оборудования при динамично меняющихся факторах и условиях протекания процесса, а также требования к качеству конечного продукта.

Список литературы

1. С.А. Ахметов, Технология глубокой переработки нефти. Гилем, Уфа, 2002. 672 с.
2. The effect of feedstock treatment on the deasphalting process / I. Goncharova, A. Safiulina, I. Khusnutdinov [et al.] // *Petroleum Science and Technology*. – 2018. – Vol. 36, No. 17. – P. 1405-1411. – DOI 10.1080/10916466.2018.1482320.
3. Исследование обезвоживания смеси нефтесодержащих отходов и высокоустойчивых водородуглеродных эмульсий / А. Г. Сафиулина, И. Ш. Хуснутдинов, А. З. Бакирова [и др.] // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2013. – Т. 16, № 9. – С. 233-234.
4. Khusnutdinov, I. Extractive deasphalting as a method of obtaining asphalt binders and low-viscosity deasphalted hydrocarbon feedstock from natural bitumen / I. Khusnutdinov, I. Goncharova, A. Safiulina // *Egyptian Journal of Petroleum*. – 2021. – Vol. 30, No. 2. – P. 69-73. – DOI 10.1016/j.ejpe.2021.03.002.
5. Патент РФ № 2417245, 27.04.2011.
6. Традиционные и альтернативные источники сырья для получения моторных топлив / Д. Н. Сафина, И.Ш. Хуснутдинов, А. Г. Сафиулина [и др.] // *Вестник Технологического университета*. – 2021. – Т. 24, № 6. – С. 26-40.
7. Перспективы производства компонентов моторных топлив из биомассы / Д. Н. Сафина, И. Ш. Хуснутдинов, А. Г. Сафиулина [и др.] // *Вестник Технологического университета*. – 2021. – Т. 24, № 9. – С. 19-41.
8. Перспективная реконструкция отделения газоразделения производств этилена / И. Ш. Хуснутдинов, А. М. Ахметзянов, М. В. Журавлева, И. Н. Гончарова // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. – 2007. – Т. 50, № 7. – С. 108-109.
9. Патент РФ № 2694341, 11.12.2018.
10. Перспективы развития, совершенствования и автоматизации высокотехнологичных производств Материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Иркутск, 24–26 апреля 2024 года. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2024. – 283 с.
11. Кисленко, Н. А. Цифровая трансформация процессов управления перерабатывающими производствами нефтегазовой отрасли на базе комбинированного моделирования / Н. А. Кисленко, Ю. В. Литвин, О. Е. Обухов // *Газовая промышленность*. – 2023. – № 9(854). – С. 82-87.
12. Шлыков, С. В. Обеспечение по управлению и контролю нефтепродуктов на основе цифровых технологий и систем автоматизации оборудования / С. В. Шлыков // *Промышленные АСУ и контроллеры*. – 2022. – № 6. – С. 19-28.
13. Федорова, Э. Р. Использование цифровых двойников в промышленности и в образовательном процессе / Э. Р. Федорова, В. В. Моргунов, Д. С. Филев // *Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса : Сборник научных трудов III Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 05–06 марта 2020 года*. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2020. – С. 371-378.
14. Kichatov, K. G. Principles of creating a digital twin prototype for the process of alkylation of benzene with propylene based on a neural network / K. G. Kichatov, T. R. Prosochkina, I. S. Vorobyova // *Fine Chemical Technologies*. – 2023. – Vol. 18, No. 5. – P. 482-497.
15. Моделирование процессов нефтепереработки и нефтехимии при помощи нейронных сетей / Д. В. Писаревский, Б. С. Жирнов, В. А. Будник, К. А. Куцуев // *Интеграция науки и производства* :

Тезисы докладов II отраслевой научно-производственной конференции, Салават, 27 ноября 2013 года. – Салават: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2013. – С. 57-59.

16. Запылкина В.В. Моделирование процесса термоллиза тяжелых нефтяных остатков методом нейронных сетей. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», 2013.

17. Современные методы математической обработки и их роль в оптимизации технологических процессов нефтехимиии нефтепереработки / Д. В. Писаревский, В. А. Будник, К. А. Куцуев, Б. С. Жирнов // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. – 2011. – № 8. – С. 16-21.

18. Александров И.А. Ректификационные и абсорбционные аппараты. Методы расчета и основы конструирования. -3-е изд. перераб. М.:Химия, 1978 – 280 С.

19. Лобанова, В. А. Алгоритм оценки качества результатов ректификации нефти аппаратом искусственных нейронных сетей с обучением / В. А. Лобанова, В. Т. Еременко // Материалы II Всероссийской научно-технической конференции "Актуальные проблемы современной науки и производства", Рязань, 15 ноября 2017 года – 17 2018 года. – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2017. – С. 57-65.

20. Моделирование режимов ректификационной очистки по результатам аналитического мониторинга сырья / В. Е. Трохин, А. М. Бессарабов, Е. В. Татарничева, Л. В. Трынкина // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2024. – № 9. – С. 19-27. – DOI 10.25791/pribor.9.2024.1523.

21. Сидельников, С. И. Математическое моделирование стоков процесса ректификации с использованием гибридных нейронных сетей / С. И. Сидельников, С. В. Голиков, Ю. А. Конюшок // Успехи в химии и химической технологии. – 2007. – Т. 21, № 2(70). – С. 50-54.

22. Гусев, С. Н. Практическое применение искусственных нейронных сетей в управлении процессом ректификации / С. Н. Гусев, В. И. Елизаров // Идентификация систем и задачи управления (SICPRO '09) : Труды VIII международной конференции, Москва, 26–30 января 2009 года. – Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2009. – С. 992-998.

УДК 547.022

Пушкарская Д.В., Черкашина Н.И., Любушкин Р.А., Рыжих Д.А.

Оптимизация концентрации инициатора в химическом процессе суспензионной полимеризации

Пушкарская Дарья Васильевна – аспирант; dashamenzhulina@mail.ru

Черкашина Наталья Игоревна – д-р техн. наук, руководитель молодежной НИЛ «Разработка научно-технических основ создания полимерных систем из возобновляемого растительного сырья», ведущий научный сотрудник кафедры;

Любушкин Роман Александрович – к.х.н., доцент кафедры;

Рыжих Дарья Александровна – аспирант;

ФГБОУ ВО «Белгородский Государственный Технологический Университет им. В.Г. Шухова», Россия, Белгород, 308012, улица Костюкова, дом 46.

В тезисах рассмотрены процессы суспензионной полимеризации в жидкой фазе этилового спирта с различными массовыми соотношениями инициатора, жидкой фазы и мономера. В исследованиях проанализированы показатели конверсии мономера в процессе полимеризации и показатели распределения частиц по их размерам.

Ключевые слова: суспензионная полимеризация, этиловый спирт, коллоидные частицы, наночастицы.

Optimization of initiator concentration in the chemical process of suspension polymerization

Pushkarskaya D.V., Cherkashina N.I., Lyubushkin R.A., Ryzhikh D.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation

The theses discuss the processes of suspension polymerization processes of suspension polymerization in the liquid phase of ethyl alcohol with different mass ratios of initiator, liquid phase and monomer. The studies analyzed the monomer conversion rates in the polymerization process and particle size distribution indices.

Key words: suspension polymerization, ethyl alcohol, colloidal particles, nanoparticles

Введение

Получение наночастиц с определенными характеристиками в коллоидной системе является актуальной областью исследования. Для создания коллоидных наночастиц необходимо добиться получения монодисперсной системы. Важной задачей является повышение устойчивости дисперсной системы и контроля над обратимыми переходами [1,2]. Получение высококонцентрированных полимерных суспензий прямым синтезом является сложной задачей. Эффективным методом получения наночастиц с узким распределением их по размерам в коллоидных системах является метод свободнорадикальной суспензионной полимеризации за счет высокой скорости протекания процесса и получения высокомолекулярного полимера в ходе быстротечного разрыва распространяющихся цепей [3-5]. Исследования разветвленных полимеров с реакционными связями C=C, полученных из мультифункциональных метакрилатов с двойными связями, являются перспективными для расширения области применения полученных полимерных систем с узким распределением наночастиц по их размерам. Процесс начинается с введения мономера в раствор, в результате чего формируется суспензия. Затем к этой суспензии добавляется инициатор, который активизирует химическую реакцию. Это приводит к образованию свободного радикала, который затем соединяется с молекулой MMA. После инициирования происходит стремительный рост цепи с последующим присоединением молекул мономера к активному центру. На следующем этапе процесса происходит обрыв цепей из-за быстрого распада активных радикалов [6-8]. Объединение наночастиц с узким распределением их по размерам в коллоидных системах позволяют получать инновационные материалы с новыми свойствами [9]. Присутствие высокодисперсной фракции частиц, в которых формируется полимер с высокой молекулярной массой, существенно влияет на среднюю молекулярную массу конечного полимера. В частицах меньшего диаметра полимеризация происходит по механизму, похожему на эмульсионный, поскольку они содержат ограниченное количество радикалов. Высокая скорость полимеризации способствует образованию полимеров с большой молекулярной массой, вызывая гель-эффект и снижая вероятность обрыва цепи. [10].

Целью работы является оптимизация концентрации инициатора в составах для получения устойчивой дисперсной системы с узким распределением наночастиц их по размерам в коллоидных системах.

Экспериментальная часть

В качестве жидкой среды для проведения суспензионной полимеризации использовали этиловый спирт ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) х.ч., с плотностью $0,78 \text{ г/см}^3$ и температурой кипения $78,4^\circ\text{C}$, в качестве мономера использовали метилметакрилат ($\text{C}_5\text{O}_2\text{H}_8$) с плотностью $0,94 \text{ г/см}^3$ и температурой кипения 101°C представляющий собой сложный эфир метилового спирта (CH_4O) и метакриловой кислоты ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_2$), а в качестве инициатора использовали наиболее распространенный, выгодный, органический пероксид – бензоилпероксид ($\text{C}_{14}\text{H}_{10}\text{O}_4$) с плотностью $1,334 \text{ г/см}^3$ и температурой плавления 106°C , который наиболее эффективен в диапазоне температур реакций $65 - 95^\circ\text{C}$. Были исследованы три состава с различными массовыми соотношениями (Таблица 1).

Таблица 1

Массовые соотношения составов			
Компонент	Состав 1	Состав 2	Состав 3
Этиловый спирт ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$), масс.%	1	1	1
Метилметакрилат ($\text{C}_5\text{O}_2\text{H}_8$), масс.%	1	1	1
Бензоилпероксид ($\text{C}_{14}\text{H}_{10}\text{O}_4$), масс.%	0,01	0,05	0,1

Для равномерного перемешивания итогового раствора использовали специализированное оборудование – магнитную мешалку AMTAST PRO (г. Лейкленд, штат Флорида, США). Ускорение процесса происходило за счет повышения температуры процесса на магнитной мешалке до 90°C и увеличением скорости перемешивания раствора магнитной лопастной мешалкой до 700 об./мин. Распределение коллоидных частиц по размерам в суспензии определяли при применении специального прибора для анализа размеров частиц в жидкой фазе Zetatrac компании Microtrac Inc. (Монтгомеривилле, штат Пенсильвания, США). Конверсию мономера растворов в процессе суспензионной полимеризации рассчитывали по формуле (1). Результаты представлены на графике (рис.1).

$$X[t] = ([M_0] - [M]/[M_0]) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $[M_0]$ и $[M]$ мольная концентрация мономера в начальный момент и в момент времени t .

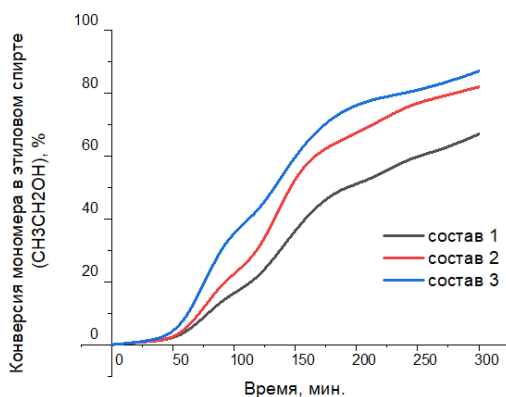


Рисунок 1 - График процесса конверсии метилметакрилата в суспензиях

Каждые 10 мин. из составов отбирались пробы для сравнительного анализа размера частиц и проверялась на приборе Zetatrac (рис.2).

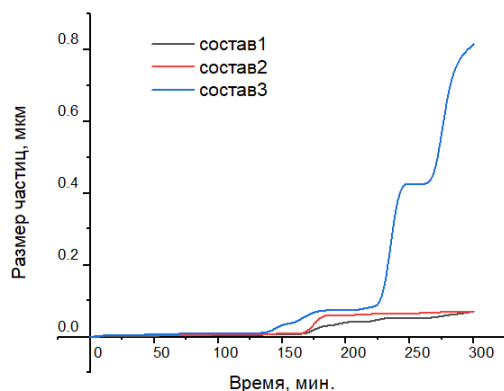


Рисунок 2 - График распределения наночастиц по размеру

Заключение

В результате проведенных исследований выявлено, что для получения более устойчивой дисперсной системы оптимальным соотношением компонентов является состав 2 с массовым соотношением инициатора 0,05 масс.%. Конверсия мономера достигает 82% на момент времени 300 мин., а размер частиц в суспензии 71 нм. Состав 1 характеризуется низким показателем конверсии мономера, следовательно, процесс образования частиц будет идти медленно и неравномерно, замедление процесса приведет к ухудшению конечного продукта, так как не весь мономер в объеме успеет прореагировать. В составе 3 размер частиц достигает 814 нм, конверсия мономера выше, так как реакция происходит быстрее, что делает дисперсную систему неустойчивой. Поэтому оптимизация концентрации инициатора в процессе суспензионной полимеризации является важным аспектом для достижения желаемых свойств полимера и эффективного контроля химического процесса.

Выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № FZWN-2024-0001с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова

Список литературы

1. Рыжов, В. А. Изучение влияния степени полимеризации на низкоэнергетические процессы в полиметилметакрилате и его короткоцепочечных олигомерах / В. А. Рыжов // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия. - 2018. - № 3. - С. 28-37. EDN: YKKXJR.
2. Бурункова, Ю. Э. Исследование влияния наночастиц SiO₂ на самоорганизацию акрилатных композитов, отверждаемых ультрафиолетовым излучением / Ю. Э. Бурункова, И. Ю. Денисюк, С. А. Семьина // Оптический журнал. - 2012. - Т. 79, № 2. - С. 67-71. - EDN TQJLXB.
3. Актуальные проблемы научных исследований: теоретический и практический аспекты : Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции, Волгоград, 12 марта 2024 года. - Стерлитамак: ООО «Агентство международных исследований», 2024. - 164 с. - ISBN 978-5-907808-43-0. - EDN KQFTMI.
4. Влияние структуры адсорбционных слоёв на формирование полимерно-мономерных частиц в процессе эмульсионной полимеризации / И. А. Грицкова, С. В. Жаченков, С. М. Левачев, Н. И. Прокопов // Пластические массы. - 2011. - № 6. - С. 3-11. - EDN OCPKSP.
5. Влияние объемного соотношения мономер/водная фаза на свойства полимерных суспензий при полимеризации метилметакрилата в присутствии полистирола / И. А. Грицкова, Н. И. Прокопов, С. М. Левачев, Н. А. Лобанова // Вестник МИТХТ им. М.В. Ломоносова. - 2012. - Т. 7, № 5. - С. 85-88. - EDN PEVOLX.
6. Композиционные структуры на основе полиметилметакрилата / Д. В. Пушкарская, Д. А. Рыжих, Р. А. Любушкин [и др.] // VI Международная конференция по коллоидной химии и физико-химической механике (IC SSPCM), Казань, 23–26 октября 2023 года. - Казань: «Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова – обособленное структурное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», 2023. - С. 176. - EDN UHONKJ.
7. Влияние водной и спиртовой среды на процесс суспензионной полимеризации метилметакрилата / Н. И. Черкашина, Д. В. Пушкарская, Д. А. Рыжих, Р. А. Любушкин // Вестник Технологического университета. - 2024. - Т. 27, № 11. - С. 46-50. - DOI 10.55421/1998-7072_2024_27_11_46. - EDN SAJABQ.

8. Пушкарская, Д. В. Факторы, оказывающие влияние на процесс полимеризации / Д. В. Пушкарская, Д. А. Рыжих // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова : Сборник докладов, Белгород, 20–21 мая 2024 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. – С. 132-135. – EDN CNWSFU.

9. Получение и свойства упорядоченных структур из полимерных микросфер / С. Д. Абдуллаев, А. А. Козлов, В. Р. Флид, И. А. Грицкова // Известия Академии наук. Серия химическая. – 2016. – № 3. – С. 756-758. – EDN VOJFQT.

10. Влияние дисперсности полиметилметакрилатных суспензий на молекулярные массы полимеров / О. А. Сацкевич, Е. С. Ключин, С. М. Левачев [и др.] // Инновации в области химии и технологии высокомолекулярных соединений ("РМС-2019") : Материалы конференции-конкурса: материалы второго всероссийского этапа VII международной конференции-конкурса и первого научно-технического форума «Полимеры - материалы будущего», Воронеж, 27–28 мая 2019 года / Под редакцией В. А. Кузнецова. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2019. – С. 77-78. – EDN LYNDX.

УДК 66.081.2

Рахманова М.И., Абдулахатов Э.Э., Нормуминов А.Б., Мавлонов Э.Т., Нурмухамедов Х.С. **Зависимость коэффициента теплопередачи от скорости потока в холодильной зоне абсорбционной колонны**

Рахманова Мухаббат Ибрагимовна – соискатель; muxabbatraxmanova76@gmail.com

Абдулахатов Элзод – магистр;

Нормуминов Азиз Бобомуродович – магистр;

Мавлонов Элбек Тулкинович - PhD, доц. ТашХТИ;

Нурмухамедов Хабибулла Сагдуллаевич - д.т.н., проф;

ТашХТИ, г.Ташкент, ул. Мирзо Улугбек, дом 41.

В тезисе рассмотрены зависимость коэффициента теплопередачи от скорости потока в холодильной зоне абсорбционной колонны. Кальцинированная сода является востребованным химическим продуктом, и ее производство сопровождается сложными тепломассообменными процессами. Одним из ключевых этапов является абсорбция аммиака и углекислого газа рассолом, при которой выделяется значительное количество теплоты. Отвод этой теплоты играет важную роль в повышении эффективности процесса. В статье рассматриваются современные методы интенсификации теплообмена в абсорбционных колоннах, включая использование теплообменных устройств с развитыми поверхностями, вращающихся и вибрирующих элементов, а также различных турбулизаторов. Особое внимание уделено влиянию спирально-накатанных турбулизаторов на процесс переноса тепла в теплообменниках «труба в трубе». Экспериментальные исследования показывают, что уменьшение шага расположения турбулизаторов приводит к увеличению коэффициента теплопередачи до 1,28 раза, а также снижению термического сопротивления. Применение таких технологий позволяет повысить эффективность теплообмена, снизить энергозатраты и минимизировать отложения солей, что делает их перспективными для промышленного использования в производстве кальцинированной соды.

Ключевые слова: кальцинированная сода, абсорбция аммиака, интенсификация теплообмена, абсорбционная колонна, спирально-накатанные турбулизаторы, коэффициент теплопередачи, энергосбережение, тепломассообмен.

Dependence of the heat transfer coefficient on the flow rate in the refrigeration zone of the absorption column

Rakhmanova M.I.¹, Abdulakhatov E.E.¹, Normuminov A.B.¹, Mavlonov.E.T.1, Nurmukhamedov H.S.¹

¹ Tashkent Institute of Chemical Technology, Tashkent, Uzbekistan.

The these discusses the dependence of the heat transfer coefficient on the flow rate in the refrigeration zone of the absorption column. Soda ash is a popular chemical product, and its production is accompanied by complex heat and mass transfer processes. One of the key stages is the absorption of ammonia and carbon dioxide by brine, during which a significant amount of heat is released. The removal of this heat plays an important role in increasing the efficiency of the process. The article considers modern methods for intensifying heat transfer in absorption columns, including the use of heat exchange devices with developed surfaces, rotating and vibrating elements, and various turbulators. Particular attention is paid to the effect of spiral-rolled turbulators on the heat transfer process in pipe-in-pipe heat exchangers. Experimental studies show that a decrease in the pitch of the turbulators leads to an increase in the heat transfer coefficient of up to 1.28 times, as well as a decrease in thermal resistance. The use of such technologies allows to increase the efficiency of heat exchange, reduce energy costs and minimize salt deposits, which makes them promising for industrial use in the production of soda ash.

Keywords: soda ash, ammonia absorption, heat exchange intensification, absorption column, spiral-rolled turbulators, heat transfer coefficient, energy saving, heat and mass transfer.

Введение

Кальцинированная сода один из востребованных химических продуктов и спрос на него во всем мире удерживается на высоком уровне, отмечается нехватка этих продуктов на рынке, цены на них постоянно растут.

В химической технологии очень много применяются абсорберы в которых протекают химические процессы, для которых проблема отвода теплоты имеет первостепенное значение. К таким процессам относится технологии получения азотной, серной кислоты, кальцинированной соды и т.д.

Нижняя часть колонны представляет собой трубчатый теплообменник, предназначенный для отвода значительной части теплоты растворения аммиака в воде [1, 2]. По трубкам теплообменника движется охлаждающая вода, в межтрубном пространстве циркулирует водный раствор аммиака, через слой которого барботирует газообразный аммиак, постепенно растворяясь в жидкости. Остаток не поглощенного аммиака поступает в верхнюю часть колонны, где проходит через колпачковые тарелки. На тарелках расположены змеевики, в которых циркулирует охлаждающая вода.

Существующее в мировой и отечественной практике ужесточение требований к характеристикам абсорбционных колонн побуждает конструкторов холодильных зон, в том числе и разработчиков колонной аппаратуры, искать оптимальные конструктивные решения и внедрять новые физические принципы, способствующие улучшению показателей тепловой и энергетической эффективности, компактности, надежности и других показателей аппаратов и устройств. Эффективность процессов абсорбции в технологии кальцинированной соды напрямую связан с интенсификацией охлаждения рассола и межфазного контакта газовой и жидкой фаз.

В производстве кальцинированной соды одним из основных аппаратов являются колонные аппараты для осуществления процесса абсорбции аммиака и углекислого газа рассолом поваренной соли [3].

В абсорбционной колонне происходит поглощение аммиака очищенным рассолом. Общеизвестно, что аммиак является хорошо растворимым газом, как в воде, так и в рассоле [4]. С повышением температуры растворимость аммиака в воде и рассоле резко снижается.

Растворимость аммиака в воде и свежем рассоле протекает с выделением тепла. Тепло, выделяющееся при растворении аммиака в воды в условиях комнатной температуры, нагревает раствор до 60-65°C. Самым примечательным фактом является то, что растворимость аммиака возрастает с повышением давления.

Поэтому, в процессе аммонизации рассола производства кальцинированной соды выделяется большое количество теплоты и проблема ее отвода и интенсификации теплообмена представляет собой одну из важнейших задач.

Достижение поставленной цели невозможно без тщательного и всестороннего анализа способов и аппаратов для проведения эффективного отвода тепла при абсорбции аммиака или углекислого газа в производстве кальцинированной соды.

Анализ схем охлаждения газовых и жидкостных потоков на стадии абсорбции показал, что наиболее приемлемым и перспективным охлаждением в процессе абсорбции являются одновременное охлаждение газа и жидкости в зоне контакта фаз с трубчато-решетчатых насадков, выполняющих функцию теплообменных устройств.

Общеизвестно, что теплообменные аппараты (ТА), составляющих в отдельных случаях более половины всего парка технологического оборудования различных отраслей является доминирующей.

Поэтому, проблема интенсификации процессов теплообмена и создания высокоэффективных аппаратов повышенной эффективности и мощности является, по-прежнему, актуальной, т.к. она тесно связана с проблемой энергосбережения и техногенного влияния производственной деятельности человеческого сообщества на окружающую среду.

В настоящее время накоплен обширный экспериментальный и теоретический материал, касающийся гидродинамики и теплообмена в ТА с неподвижными теплообменными элементами [3-5].

Результаты экспериментальных исследований Горской Т.Ю. по изучению гидродинамических закономерностей течения вязких жидкостей в ламинарном режиме в теплообменных устройствах с вращающейся рабочей поверхностью, типа «конфузор-диффузор» [6], показали их высокую эффективность. Известно, что при течении вязкой жидкости в неподвижных каналах типа «конфузор-диффузор» критерий Нуссельта увеличивается в 1,5 раза, а во вращающихся цилиндрических каналах может возрасти в 3-5 раз. Однако этот метод несколько усложняет технология сборки трубного пучка.

Общеизвестным способом повышения эффективности ТА является гидродинамическое воздействие на поток жидкости путем его вращения или вибрации. Естественно, высокие коэффициенты теплоотдачи, которые наблюдаются во вращающихся каналах, делают возможным их применение в качестве элементов ротационных теплообменников. Одним из достоинств данных теплообменников является их компактность. Кроме того, такие аппараты позволяют изменять интенсивность теплообмена при неизменном расходе теплоносителей за счет скорости вращения поверхности теплообмена [7], а также уменьшить термическое сопротивление теплообмену (в 3-10

раз) [3-8,9,10]. Вместе с тем, вращение или вибрация теплообменной поверхности требует дополнительных затрат и усложняет конструкцию аппарата.

Анализ способов и методов переноса тепла в работах Ю.Г. Назмеева [11], В.К. Мигая [9], Г. А. Дрейцера [10,12,13], А.А. Гухмана [14], Ю.Ф. Гортышова [15], С.С. Кутателадзе [16] показал, что при разработке теплообменного оборудования используется достаточно много способов интенсификации. Некоторые из них традиционные: использование турбулентного режима течения теплоносителей; уменьшение диаметра каналов; повышение скорости течения сред; оребрение поверхности теплообмена; применение коротких каналов и прерывистых поверхностей теплообмена; турбулизация пограничного слоя; пленочное течение среды по поверхности теплообмена; использование криволинейных каналов; создание вторичных течений путем перемешивания или закручивания потоков.

В исследованиях [17] показано, что одним из эффективных методов интенсификации теплообмена является гидродинамическое воздействие на поток, которое реализуется увеличением скорости движения жидкости, искусственной, турбулизацией потока путем установки планок, решеток, завихрителей и вставок, а также турбулизацией пограничного слоя за счет применения выступов и шероховатостей. Для этих целей в трубах устанавливают вставки в виде шнека или плоской ленты, лопаточного завихрителя по типу многолопастного пропеллера или турбинного колеса, закручивают поток посредством тангенциального подвода жидкости, а также с использованием комбинированных способов [15,17]: шероховатая труба с ленточным закручивателем; труба с внутренним оребрением и ленточным закручивателем. Закрутка потока является эффективным методом интенсификации конвективного теплообмена. В этом случае увеличиваются пристеночные скорости, и происходит общая перестройка течения. Закрутка потока в трубах реальных энергетических теплообменников наиболее технологически просто осуществляется при применении полосковых и пластинчатых закручивателей, спиральных труб и труб с внутренним, спиральным оребрением, винтообразного профилирования [18]. К недостаткам данного метода следует отнести дополнительные затраты металла и образование налета загрязнений, который приводит к усложнению процесса очистки труб.

Основные требования при создании теплообменных устройств различного назначения заключается в обеспечении как можно меньших объемов, масс, энергетических затрат на прокачку рабочего вещества и в тоже время возможно большей теплопередающей способности. Трудность сочетания указанных требований очевидна, поэтому, как правило, необходимо искать наилучшие компромиссные инженерные решения. При этом неизбежно приходится решать задачу интенсификации процесса теплообмена в каналах для повышения тепловой эффективности аппарата или системы в целом [6,19]. Обычно некоторую интенсификацию дают различные дистанционирующие устройства, устанавливаемые в межтрубном пространстве. На наш взгляд, более эффективным является применение плотноупакованных пучков из труб с развитыми теплообменными поверхностями [20,21,22].

Однако, несмотря на значительный теоретический и экспериментальный материал по методам интенсификации конвективного теплообмена [9,11-17], в настоящее время остались недостаточно разработаны вопросы, касающиеся теплообмена при переходном режимах течения потока жидкости в каналах с развитыми поверхностями.

Экспериментальная часть

Для экспериментального определения влияния дискретных спирально-накатанных турбулизаторов на процесс переноса охлаждения жидкостей спроектирована установка на основе теплообменника «труба в трубе». На рис.1 представлены результаты по изменению коэффициента теплопередачи K от скорости воды Re при охлаждении рассола, а также влияние роста K на необходимую поверхность конвективного теплообмена.

Как видно из рис.1а, с ростом числа Рейнольдса Re при численных значениях шага размещения турбулизаторов t/d зависимость коэффициента теплопередачи числа Рейнольдса $K=f(Re)$ имеет возрастающий характер абсолютно для всех t/d .

Представленный график для исследованных 4-х труб с различным шагом размещения турбулизаторов показывает, что наибольший переноса тепла приходится на трубы с наименьшим шагом t/d . Так, при числе $Re=3500$ величина коэффициента K равна 504, при $Re=5500$ значение коэффициента $K=920$ и при $Re=9800$ – соответственно $K=1260$ Вт/(м²×К).

Влияние скорости потока на коэффициент теплопередачи при охлаждении значительно [5,9-21,23,]. Однако, и шаг размещения турбулизаторов по длине трубы также оказывает ощутимое влияние на перенос конвективного переноса тепла.

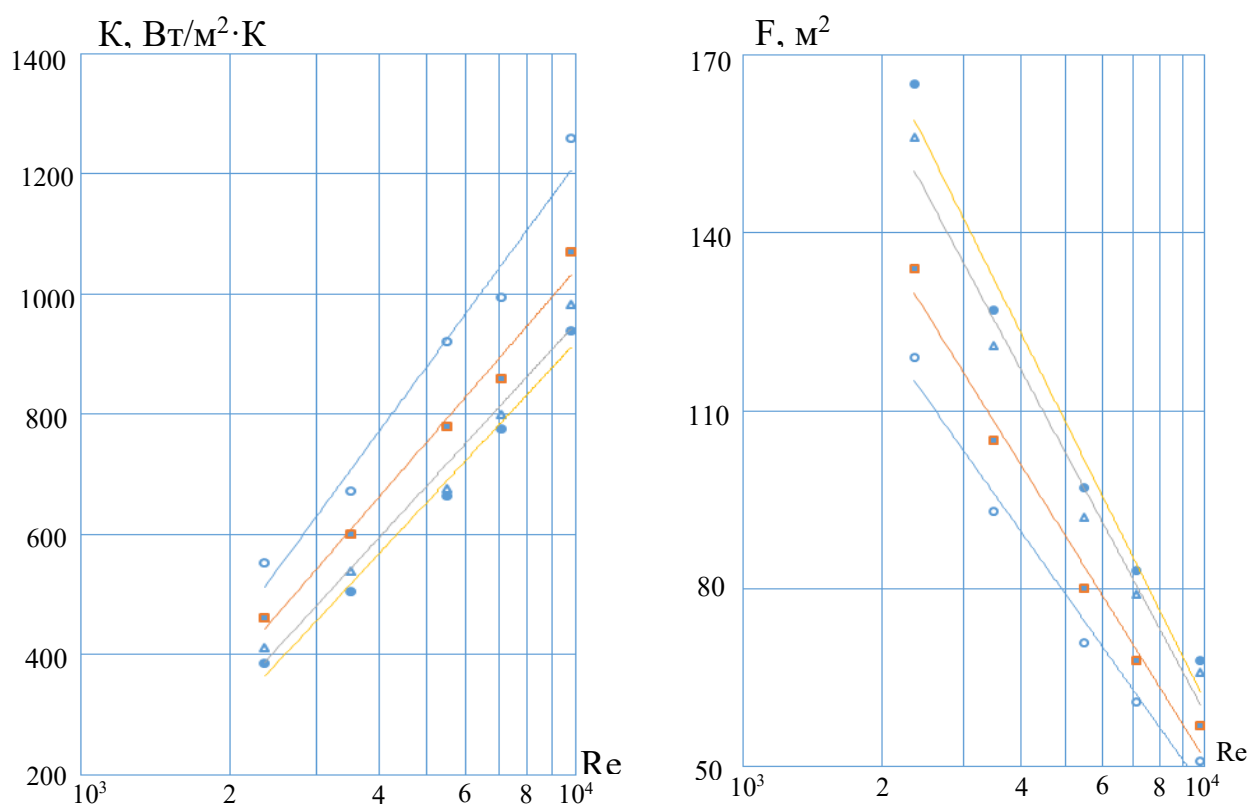


Рисунок 1 - Зависимость коэффициента теплопередачи от скорости охлаждающей воды в трубчато-решетчатой тарелке при абсорбции аммиака рассолом.
 $h/s=0,034$; $\circ$ - $t/d=0,88$; $\blacksquare$ - $t/d=1,14$; $\triangle$ - $t/d=1,55$; $\bullet$ - $t/d=1,7$.

Сопоставление данных по теплопередаче при охлаждении рассола водой в зависимости от шага размещения турбулизаторов в виде плавно очерченных канавок снаружи, и соответствующих выступов внутри труб, показывает, что при $Re=7100$ для трубы с шагом $t/d=1,7$ величина коэффициента теплопередачи $K=776$, при $t/d=1,14$ значение $K=860$ и при $t/d=0,88$ – $K=995 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$. Со снижением значение шага размещения перенос тепла возрастает в 1,28 раза.

На рис.16 иллюстрируются изменения необходимой поверхности теплообмена для осуществления процесса охлаждения рассола, полученные расчетным путем на основе данных по коэффициенту теплопередачи.

Заключение

Применение труб с дискретно расположенными турбулизаторами в виде спиралевидных выступов внутри и соответствующими канавками снаружи позволяют значительно интенсифицировать процесс переноса тепла при довольно-таки умеренном росте гидравлического сопротивления [8,10-15,22,].

Применение подобных труб с интенсификаторами приводит к турбулизации потока жидкости у стенки, приводит к снижению термического сопротивления, что способствует не только к интенсификации переноса тепла, а следовательно, и препятствует отложению солей.

Список литературы

1. Дрейцер Г.А., Мякочин А.С., Неверов А.С. и др. Испытание новых конструкций промышленных высокоэффективных трубчатых теплообменных аппаратов // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. - М.: МЭИ, 1998.
2. Рамм В. М. Абсорбция газов. - Л.: Химия, 1976. - 654 с.

3. Линкевич В.А. Технология кальцинированной соды. – Ташкент: ГАК «Узкимесаноат», 2006. – 96 с.
4. Позин М.Е. Технология минеральных удобрений. – Л.: Химия, 1983. – 336 с.
5. Горская Т.Ю. Гидродинамика ламинарного течения вязкой жидкости в теплообменных устройствах с вращающейся поверхностью типа «диффузор-конфузор». Казань, КХТУ, Дисс...канд.техн.наук, 2004. – 110 с.
6. Керн Д. Развитые поверхности теплообмена. – М.: Энергия, 1977. – 315 с.
7. Зайцев А.А., Скачко И.М. и др. Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче во вращающихся каналах в поле нескольких массовых сил // Изв. ВУЗов «Химия и химическая технология», 1989. – т.32. №11. – с.97-103.
8. Светлов Ю.В. Интенсификация гидродинамических и тепловых процессов в аппаратах с турбулизаторами потока. – М.: Энергоатомиздат, 2003. 304 с.
9. Мигай В.К., Повышение эффективности современных теплообменников. – Л.: Энергия, 1984. – 146 с.
10. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. – М.: Машиностроение, 1990. – 208 с.
11. Назмеев Ю.Г. Теплообмен при ламинарном течении жидкости в дискретно-шероховатых каналах. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 306 с.
12. Дрейцер Г.А. О некоторых проблемах создания высокоэффективных трубчатых теплообменных аппаратов // http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/to_Hxlcd7.htm.
13. Линкевич В.А. Технология кальцинированной соды. – Т.: ГАК «Узхимпром», 2005. – 96 с.
14. Гухман А.А., Интенсификация конвективного теплообмена и проблема сравнительной оценки теплообмена поверхностей // Теплоэнергетика, 1977 - №7. – с. 5-8.
15. Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В., Попов И.А. Эффективность промышленно-перспективных интенсификаторов теплоотдачи // Известие АН «Энергетика», 2002. - №3. – с.17-24.
16. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 262 с.
17. Давлетшин Ф.М., Овчинников А.А., Николаев Н.А. Интенсификация теплообмена при дисперсно-кольцевом течении газожидкостного потока в каналах. – Казань, КГУ, 2001. – 87 с.
18. Боголюбов Ю.Н., Лившиц М.Н., Григорьев Г.В. Результаты исследовательского и промышленного внедрения винтообразно-профилированных труб // Теплоэнергетика, 1981. - №7.- с.48-50.
19. Yusupbekov N.R., Nurmuhamedov H.S., Zokirov S.G. Kimyoviy texnologiya asosiy jarayon va qurilmalari. - Toshkent, Fan va texnologiya, 2015. – 848 b.
20. Нурмухамедов Х.С., Закиров С.Г., Юсупбеков Н.Р., Темиров О.Ш. ва б. Газларни кайта ишлаш технологияси, жараён ва қурилмалари. – Т.: Шарк, 2016. – 856 б.
21. Dzyubenko B.V., Dreitser G.A., Yakimenko R.I. Methodics of Optimum Configuration Choice for Heat Transfer Surfaces of Space Heat Exchangers // Proc. of the First Int.Conf. on Aerospace Heat Exchangers Technology (Palo Alto, USA, 1998), Amsterdam-London: Elsevier, 1998.
22. Кунтыш В.Б., Бессонный А.Н., Дрейцер Г.А., Егоров И.Ф. Примеры расчетов нестандартизованных эффективных теплообменников.-СПб.: Недра, 2000. 300 с.
23. Кузминский А.В., Смирнов Е.М., Юркин С.В. Экспериментальное исследование развивающегося течения в каналах квадратного сечения вращающимся вокруг поперечной оси // ИФЖ, 1983. – т.45.-№4.- с.662-663 с.

УДК 66.011

Рудобашта С.П., Карташов Э.М., Зуева Г.А.

Электромагнитная сушка материалов

Рудобашта Станислав Павлович – д.т.н., профессор кафедры;

ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»,

Россия, Москва, Тимирязевская, 49

Карташов Эдуард Михайлович – д.ф.-м.н., профессор кафедры;

ФГБОУ ВО Российский технологический университет - МИРЭА (Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова)

Россия, Москва, проспект Вернадского, 86, стр. 8

Зуева Галина Альбертовна – д.ф.-м.н., заведующий кафедрой;

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет»,

Россия, Иваново, Шереметевский проспект, 7

В тезисах рассмотрены аналитические математические модели процесса тепло- и массообмена при электромагнитном подводе энергии к высушиваемому материалу - для тел в форме пластины, цилиндра и шара. Постановка задач предполагает как чисто электромагнитный подвод энергии, так и конвективно-электромагнитный. Решения задач нагрева тел получены при граничном условии теплообмена третьего рода с учетом стока теплоты на испарение влаги у поверхности тел. Массообмен описан на основе решений задач массопроводности при условии, что перенос влаги в высушиваемых телах происходит по механизму массопроводности. Это правомерно в случае, когда температура тел в процессе нагрева не увеличивается сверх некоторой «сверхкритической» величины и поэтому внутренним переносом влаги под действием градиентов температур и общего давления можно пренебречь. Результаты расчетов по математическим моделям проиллюстрированы графиками. Рассмотрены следующие случаи подвода энергии: осциллирующий инфракрасный и непрерывный электромагнитный с подводом энергии в высокочастотном и сверхвысокочастотном диапазонах. Для осциллирующего инфракрасного энергоподвода результаты расчета сопоставлены с экспериментом.

Ключевые слова: сушка, электромагнитный энергоподвод, пластина, цилиндр, сфера.

Electromagnetic drying of materials

Rudobashta S.P.¹, Kartashov E.M.², Zueva G.A.³

¹ K. A. Timiryazev Russian State Agrarian University — MSKhA, Moscow, Russian Federation

² MIRÉA — Russian Technological University (M. V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow, Russian Federation

³ Ivanovo State Chemical Technological University, Ivanovo, Russian Federation

The abstract considers analytical mathematical models of heat and mass transfer process with electromagnetic energy supply to the material being dried - for bodies in the form of a plate, cylinder and sphere. The statement of the problems assumes both purely electromagnetic and convective-electromagnetic energy supply. Solutions of the problems of heating bodies are obtained under the boundary condition of heat transfer of the third kind taking into account the heat sink for moisture evaporation at the surface of the bodies. Mass transfer is described based on solutions of mass conductivity problems provided that moisture transfer in the bodies being dried occurs by the mass conductivity mechanism. This is valid in the case when the temperature of the bodies during heating does not increase above a certain "supercritical" value and therefore internal moisture transfer under the action of temperature gradients and total pressure can be neglected. The results of calculations using mathematical models are illustrated by graphs. The following cases of energy supply are considered: oscillating infrared and continuous electromagnetic with energy supply in the high-frequency and ultra-high-frequency ranges. For oscillating infrared energy supply, the calculation results are compared with the experiment.

Keywords: drying, electromagnetic energy supply, plate, cylinder, sphere.

Key words: drying, electromagnetic energy supply, plate, cylinder, sphere.

Введение

В последние годы большое внимание в литературе уделяется электромагнитной сушке материалов при подводе энергии в поле токов высокой и сверхвысокой частоты (ТВЧ-сушка, СВЧ-сушка) или в инфракрасном диапазоне частот (ИК-сушка). Об этом свидетельствуют, в частности, много-

численные публикации в международном журнале «Drying Technology». Это объясняется достоинствами этого вида энергоподвода, отмеченными в [1]. Для выбора рационального (в пределах оптимального) технологического режима процесса сушки большое значение имеет наличие адекватной математической модели процесса, с помощью которой можно методом численного моделирования находить нужный режим. Для математического моделирования процесса электромагнитной сушки в настоящее время используются как аналитические, так и численные методы, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки [2]. Ниже описаны некоторые наши результаты по разработке аналитических математических моделей теплообмена при электромагнитном подводе энергии.

Осциллирующая инфракрасная сушка

Осциллирующая (импульсная) инфракрасная сушка применяется для сушки термолабильных материалов. В ряде случаев за счет такого температурного режима удастся не только сохранить качество высушиваемого материала, но и существенно его улучшить. В данном случае речь идет о послеуборочной сушке семян. Как показано в [3], в результате инфракрасной сушки семян овощных культур, нетрадиционных и редких растений при осцилляции температуры материала в интервале $34^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C}$ (среднее значение 37°C) происходит стимуляция семян, проявляющаяся в увеличении их энергии прорастания и всхожести. На данный способ сушки имеется получен патент на изобретение [4]. Были разработаны аналитические математические модели теплообмена в этом процессе при инфракрасном энергоподводе для тел трех форм (пластина, цилиндр, шар), в которых учитывался конвективный теплообмен тел с внешней газовой средой и испарение влаги у поверхности тела. Осцилляции температуры задавались с помощью единичной функции Хевисайда. На рис.1 показано сопоставлений расчетной и опытной термограмм семян, высушиваемых ИК-способом в монослое. Как видно из рисунка, обе термограммы хорошо согласуются.

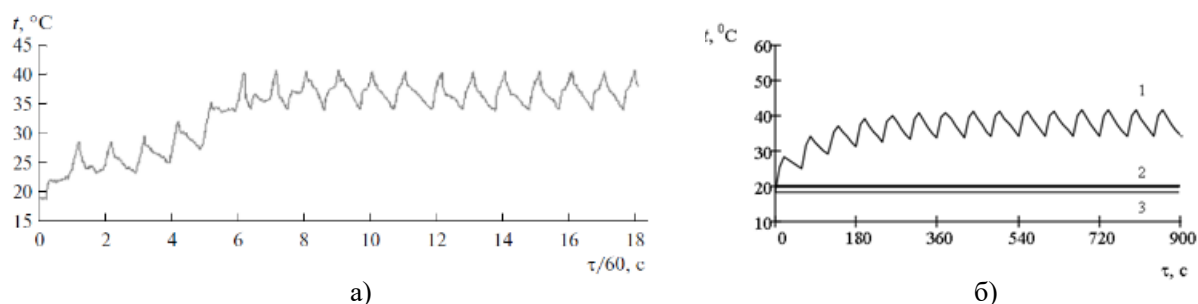


Рисунок 1 - Изменение температуры монослоя семян огурца сорта «Водолей» во времени при осциллирующей ИК-сушке: а) – эксперимент, б) – расчет по математической модели ($q_0 = 1810 \text{ Вт/м}^2$).

Важно отметить, что методом математического моделирования путем изменения плотности лучистого потока q_0 , поступающего на монослой семян, удастся подобрать температурный режим, который обеспечивает колебание температуры семян в интервале $34^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C}$, который, как отмечено выше, вызывает стимуляцию семян.

Непрерывная ТВЧ- и СВЧ-сушка материалов

Осциллирующий подвод электромагнитной энергии, как отмечено выше, необходим при сушке термолабильных материалов. Однако, на практике высушивается достаточно большое количество материалов, которые таковыми не являются. Для расчета и анализа тепломассопереноса при их сушке необходимы математические модели, описывающие их непрерывный электромагнитный нагрев с учетом стока теплоты на испарение влаги. Нами сформулированы и аналитически решены линейные (постоянство параметров процесса) задачи нагрева пластины, цилиндра и шара при этих видах энергоподвода в условиях конвективной сушки и с учетом конвективного тепло- и массообмена тела с внешней газовой средой - как в общем случае, так и при сушке в первом периоде. При ТВЧ- и СВЧ-сушке электромагнитная энергия проникает глубоко в толщу материала, поэтому в данном случае было принято, что объемный источник теплоты в теле, вызванный подводом электромагнитной энергии, постоянен: $N_{em} = \text{const}$. Мощность этого источника в аппарате задавали по соотношению

$$N_{em}\eta_t = q_v V = q_v V_{rab}(1 - \varepsilon), \quad (1)$$

где N_{em} – действующий внутри сушильного аппарата источник электромагнитной энергии, Вт; η_t – термический КПД этого источника; q_v – внутренний объемный источник электромагнитной энергии, Вт/м³; V_{rab} – рабочий объем аппарата, м³; $(1-\varepsilon)$ – доля рабочего объема, занятого материалом, м³/м³; ε – порозность слоя, м³/(м³ слоя).

Были приняты также следующие условия и допущения: у поверхностей тела имеет место конвективный тепло-и массообмен с внешней газовой средой в соответствии с граничными условиями теплообмена и массообмена 3-го рода [2]; температура внешней среды постоянна; в момент начала процесса температура в теле распределена равномерно; все теплофизические характеристики процесса постоянны; тело равномерно облучается по поверхности, испарение влаги происходит у поверхности тела (внутренние фазовые стоки теплоты отсутствуют); термовлагопроводность и фильтрационный перенос влаги пренебрежимо малы. При этих условиях были получены аналитические решения для тел в форме пластины, цилиндра и шара, которые позволяют проводить численный анализ процесса. На рис. 2 приведены расчетные термограммы, показывающие влияние мощности электромагнитного источника на изменение среднеобъемной температуры пластины.

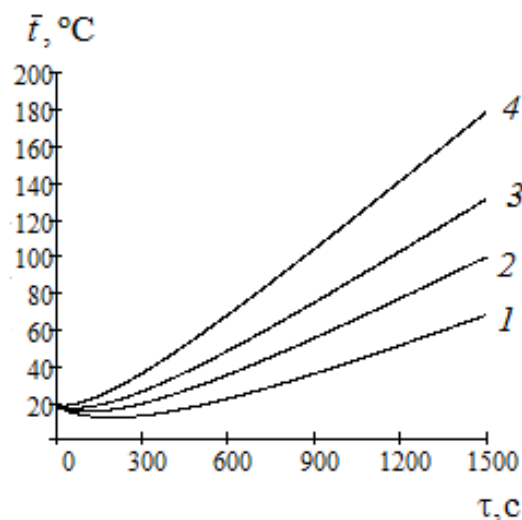


Рисунок 2 - Изменение среднеобъемной температуры пластины во времени при N_{em} , (кВт), равном: 1 – 40; 2 – 50; 3 – 60; 4 – 75 - при определенных заданных параметрах процесса

Как видно из рисунка, с увеличением мощности N_{em} темп нагрева высушиваемого тела закономерно увеличивается. При мощностях источника $N_{em} = 40$ и 50 кВт (кривые 1 и 2 на графиках) наблюдается сначала понижение температуры материала во времени, а затем ее рост. Это объясняется влиянием испарительного охлаждения на нагрев тела: мощность электромагнитного источника в этих случаях мала и ее вначале не хватает на испарение влаги, поэтому для испарения влаги частично используется теплота, аккумулированная в материале, что понижает его температуру.

Для расчета по представленным математическим моделям необходимы данные по теплофизическим характеристикам материалов, включая основной коэффициент внутреннего массопереноса – коэффициент массопроводности. В последние годы банк данных по этому коэффициенту существенно пополнился, данные по которому для разных материалов приведены в [2,5],

Заключение

1. Рассмотрена осциллирующая инфракрасная сушка термолабильных материалов, для которой получены аналитические решения задач инфракрасного нагрева тел в форме пластины, цилиндра и шара с учетом испарения из них влаги. При аналитическом решении задачи осцилляции температуры задавались с помощью единичной функции Хевисайда. Результаты численного эксперимента, сопоставленные с экспериментальными данными, показали их хорошее согласование.

2. Проанализирована непрерывная ТВЧ- и СВЧ- сушка тел в форме пластины, цилиндра и шара, для которых авторами получены аналитические решения. Проанализировано влияние мощности электромагнитного источника на темп нагрева тела в условиях его сушки..

3. Развитые математические модели содержат аналитические решения задач массопроводности, что предполагает наличие данных по коэффициентам массопроводности. Отмечено, что банк данных по этому коэффициенту в последние годы существенно пополнился новыми результатами.

Список литературы

1. Ratti C., Mujumdar A. S. Infrared drying. pp. 423-438. In Handbook of Industrial Drying. 3rd edition. A.S. Mujumdar (Ed). Boca Raton, FL.: CRC Press, 2007.
2. Рудобашта С.П. Массообмен в процессах сушки, адсорбции, экстрагирования, диффузионной паропроницаемости. Москва. Колос-с. 2024.
3. Рудобашта С.П., Григорьев И.В. Импульсная инфракрасная сушка семян. Промышленная теплотехника. 2011. Т. 33, № 8. С. 85-90.
4. Патент на изобретение № 2393397 РФ. Способ импульсной инфракрасной сушки термолabileльных материалов / И.В. Григорьев, С.П.Рудобашта // Регистрационный № 2 393 397 С2. – Заявка № 2009119751 , дата публикации от 27.06.2010 г., бюллетень №18. – С. 894.
5. Рудобашта С.П., Зуева Г.А., Дмитриев В.М., Зуев Н.А. Массопроводность при сушке коллоидных капиллярно-пористых материалов // Известия вузов. Химия и химич. технология. 2014. Т. 57. Вып. 1. С. 103-107.

УДК 004.032.26

Салякин А.Е., Пономарев С.А., Гарифуллина Э.В., Бронская В.В., Мухаметзянова А.Г.
Нейросетевое моделирование установки первичной переработки нефти

Салякин Антон Евгеньевич – аспирант; mcrofficial182@gmail.com

Пономарев Серафим Александрович – магистрант;

Гарифуллина Эльвира Валерьевна – к.т.н., доцент кафедры химической технологии переработки нефти и газа;

Бронская Вероника Владимировна – к.т.н., доцент кафедры процессов и аппаратов химической технологии;

Мухаметзянова Асия Габдулмазитовна – д.т.н., зав. кафедры инженерной компьютерной графики и автоматизированного проектирования;

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»,
Россия, Казань, 420015, улица Карла Маркса, дом 68.

В тезисах рассмотрено развитие нефтегазовой отрасли в рамках цифровизации, где широко используются нейронные сети, способные проводить масштабный анализ исходных данных с поиском неявных закономерностей проводимых процессов. Нейронные сети предлагается использовать для моделирования процессов объектов нефтегазовой отрасли для поиска оптимального режима и избежания экономических убытков из-за изменений режима при изменении качества и количества сырья, поступающего на заводы..

Ключевые слова: цифровизация, установка первичной переработки нефти, нейронная сеть, моделирование технологического процесса.

Neural network modeling of primary oil refining unit

Salyakin A.E., Ponomarev S.A., Garifullina E.V., Bronskaya V.V., Mukhametzyanova A.G.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kazan National Research Technological University",

Russia, Kazan, 420015, Karl Marx Street, Building 68.

The theses consider the development of the oil and gas industry within the framework of digitalization, where neural networks are widely used, capable of conducting a large-scale analysis of initial data with the search for implicit patterns of the processes being carried out. Neural networks are proposed to be used to model the processes of oil and gas industry facilities to find the optimal mode and avoid economic losses due to changes in the mode when the quality and quantity of raw materials arriving at the plants change.

Keywords: digitalization, primary oil refining unit, neural network, process modeling.

Введение

Нефтегазовая отрасль – одна из важнейших областей промышленности нашей страны, которая формирует значительный вклад в ее экономику. Доля нефтегазовых доходов в наполнении федерального бюджета России в 2024 г. достигла более 31% по сравнению с 28% за аналогичный период [1]. При этом объекты нефтегазовой отрасли – заводы по добыче и переработке нефти и газа – являются площадкой для разработки и внедрения новых технологий, что соответствует проводимой на данный момент промышленной революции.

Основой промышленной революции является полномасштабное внедрение информационных технологий, искусственного интеллекта, автоматизации производственных процессов и робототехники. В качестве инструментов при этом используются: машинное зрение, нейросети, аналитика больших данных, беспилотные летательные аппараты, облачные вычисления, интернет вещей, дополненная/виртуальная реальность, информационная безопасность [2].

Благодаря внедрению таких технологий увеличивается производительность технологических процессов, повышается качество продукции, уменьшается риск возникновения аварийных ситуаций за счет снижения влияния человеческого фактора.

Нейросетевое моделирование

Машинное обучение является одним из основных инструментов цифровизации. Искусственный интеллект, работающий по принципу биологической нервной системы, позволяет находить закономерности изменения величин на основе полученной выборки с вычислением вероятного результата. Основными структурными единицами сети являются нейроны, которые располагаются послойно: нейроны входного слоя принимают исходные данные от тестовой выборки. Далее они передают информацию по связям нейронам скрытого слоя, при этом количество нейронов на скрытых

слоях и количество этих слоев может достигать больших значений, которое зависит от сложности и масштабности поставленной задачи. Связи между нейронами на разных слоях несут с собой величину, которая по мере прохождения к последнему слою – выходному – приводит исходные значения к необходимому выходному значению (рис.1).

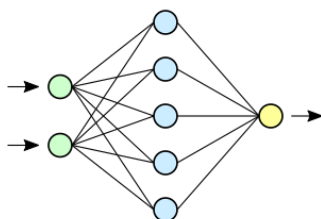


Рисунок 1 - Схема работы нейронной сети: зелёным цветом обозначены входные нейроны, голубым — скрытые нейроны, жёлтым — выходной нейрон

Потенциал использования нейронной сети – моделирование технологических процессов, но не на основе термодинамических закономерностей изменения материального и теплового баланса, как это реализовывалось ранее, а на основе обучающей выборки с эксплуатируемой установкой. Такой подход упрощает создание модели и делает акцент на особенностях ведения процесса конкретной установки.

Необходимость создания нейросетевой модели обусловлена особенностями ведения технологического процесса, связанными с колебаниями режима из-за изменения количества и качества сырья, поступающего в сырьевой парк установки. При этом чем больше металлоемкость и мощность установки, тем сильнее колебания режима отражаются на ее работе.

К таким установкам относятся установки первичной переработки нефти (нефтеперерабатывающий завод) и газового конденсата (газоперерабатывающий завод), которые обеспечивают вторичным сырьем последующие процессы переработки. Кроме того, необходимость снабжать сырьем процессы вторичной переработки приводят к повышенным требованиям по бесперебойной работе установки и постоянству качества узких фракций [3].

Все это приводит к особенностям ведения технологического процесса, которые выражаются в необходимости оперативному персоналу прибегать к ручному регулированию режима, отходя от регламентируемой методики, дабы компенсировать расхождение качества полученной продукции от заданных требований. При этом отход от регламентированного режима приводит к увеличению себестоимости и недополучению прибыли из-за брака продукции, перерасхода энергоресурсов и реагентов, что и приводит к необходимости оптимизации.

Особенности изменения режима рассматриваются на примере атмосферного блока установки первичной переработки нефти (рис. 2), состоящей из:

- отбензинивающей колонны (колонна К-1);
- колонны атмосферной перегонки (колонна К-2);
- блока разделения бензинов (колонна К-3).

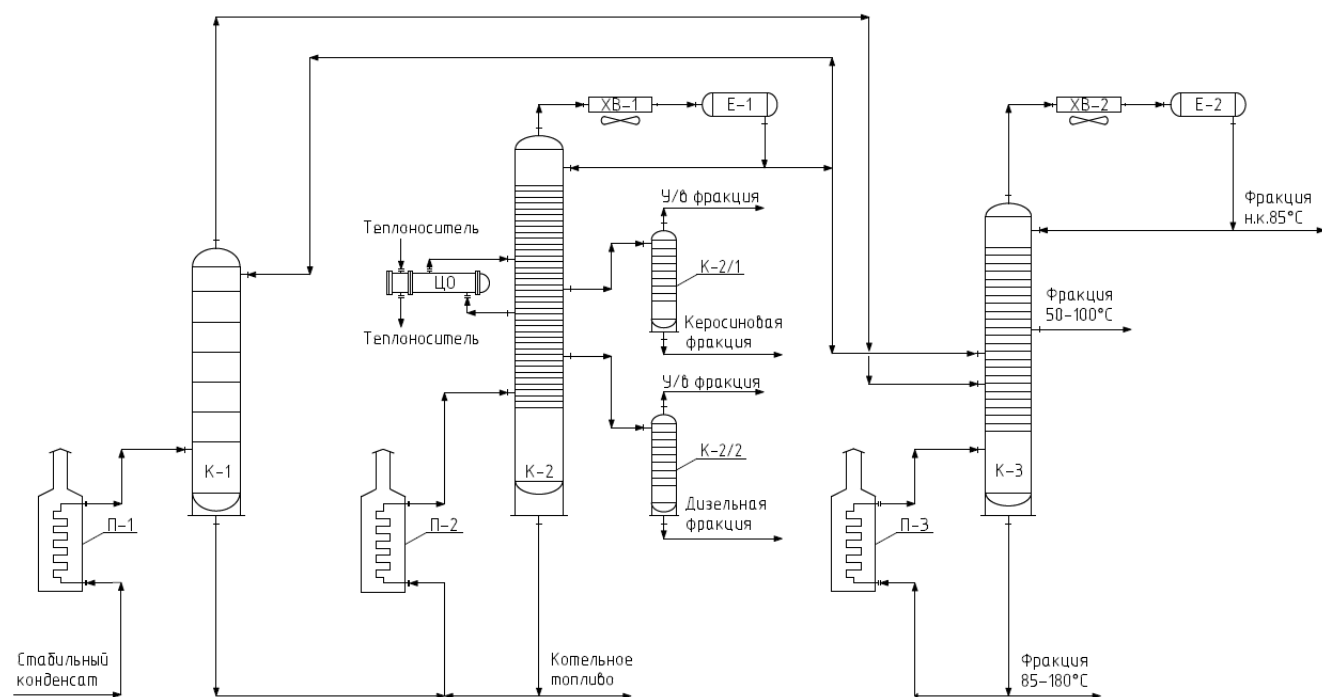


Рисунок 2 - Схема атмосферного блока установки первичной переработки нефти: К-1, К-2, К-3 — ректификационные колонны; К-2/1, К-2/2 — стриппинг секции; П-1, П-2, П-3 — печи нагрева; ХВ-1, ХВ-2 — аппараты воздушного охлаждения; Е-1, Е-2 — рефлюксные емкости; ЦО — теплообменник охлаждения циркуляционного орошения.

Облегчение сырья, связанного зачастую с поставкой нефти с различных месторождений, при постоянстве параметров работы колонны отбензинивания К-1, приводит к увеличению загрузки установки и изменению качества продуктов. Увеличение загрузки дестабилизирует режим на взаимосвязанных товарно-сырьевых парках и установках. Влияние на качество продукции обусловлено увеличением количества восходящих паров, которые в свою очередь начинают уносить в верхнюю часть колонны высококипящие компоненты. Результат этого явления отразится на конце кипения кубового продукта колонны К-3, данный показатель является ключевым для вторичных процессов. Корректировка заключается в увеличении количества острого орошения -и/ -или снижении температуры в кубе К-1.

Колонна К-2 предназначена для разделения отбензиненной нефти на фракции по температурам выкипания. Значения температур начала, выкипания 50% об. и конца выкипания боковых погоннов являются определяющими для режима работы таких колонн. На начало кипения этих фракций влияет доля легкого компонента в жидкой фазе, изменить которую можно регулированием температуры или давления верха колонны. Изменение количества отбора жидкости с тарелки, соответствующей боковому погону, позволяет увеличить ее конец кипения. Как правило, в сложных колоннах присутствует не менее одного промежуточного циркуляционного орошения, которое предназначено для снижения тепловых нагрузок. На практике, регулированием температуры и расхода циркуляционного орошения можно сместить разгонку для вышележащей фракции и изменить балансовый выход продуктов.

В колонне К-3 целевой фракцией является кубовый продукт. Как было сказано выше, на ее конец кипения можно повлиять регулированием режима колонны К-1. Следовательно, если в колонну К-3 попадает облегченное сырье, то принятие мер путем изменения параметров работы колонны К-3 является нецелесообразным, так как необходимые более высококипящие компоненты были отделены ранее в К-1. Так же, колонна разделения бензинов может иметь боковой погон. Начало кипения кубового продукта корректируется количеством отбора жидкости с тарелки, соответствующей боковому погону.

Таким образом, основными инструментами регулирования режима работы колонн являются количество орошения, температура куба, давление, количество отбора жидкости с тарелки. Регулирование технологического режима осуществляется по общим принципам, но каждый отдельно

взятый объект имеет свои тонкости и нюансы в настройке по причине множества второстепенных факторов.

Для проведения работ по оптимизации процесса и систематизации стабильности качества продукции в данной работе предлагается использовать искусственную нейронную сеть, выполняющий комплексный анализ неявных закономерностей показателей работы установки при разных режимах работы. Нейросетевая модель установки в качестве альтернативного источника принятия решений позволит выявить второстепенные факторы, учесть все особенности процесса и корректировать режим по необходимым показателям качества продукции в режиме реального времени, адекватно и своевременно реагируя на изменение режима. Для разработки и машинного обучения такой модели необходимо использовать обучающую выборку, состоящую из данных о показателях режима работы в разрезе продолжительного времени работы [4, 5].

Заключение

В итоге будет получен цифровой помощник управления производством, являющийся средством мониторинга производственных процессов, способный выровнять режим работы, повысить эффективность функционирования и качество организации работы производства, избежать потерю качества получаемой продукции, увеличить ресурсосбережение и избежать рисков повышения себестоимости.

Список литературы

1. Доля нефтегазовых доходов бюджета в 2024 году растёт выше плана [Электронный ресурс] // Ведомости / Аналитика: сайт. - URL: https://www.vedomosti.ru/analytics/krupnyy_plan/articles/2024/10/30/1071779-dolya-neftegazovih-dohodov-byudzheta-2024-rastet-vishe-plana (дата обращения 13.03.2025).
2. Салайкин А.Е., Никитин С.А., Гарифуллина Э.В., Бронская В.В., Харитонов О.С., Мухаметзянова А.Г. Цифровизация установок первичной переработки нефти // Сборник научных трудов IV Всероссийской научной конференции с международным участием. – 2023 г. – С. 118-125.
3. Технология и оборудование процессов переработки нефти и газа. Санкт-Петербург: Недра, 2006.
4. Султанова Л.Р., Костромин Р.Н., Бронская В.В., Харитонов О.С., Игнашина Т.В., Гарифуллина Э.В. РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОДЕРЖАНИЯ СВЕТЛЫХ ФРАКЦИЙ В НЕФТЯХ // Вестник Технологического университета. 2022. Т. 25. № 6. С. 105-109.
5. Федотов Р.А., Бронская В.В., Бальзамов Д.С., Игнашина Т.В., Гарифуллина Э.В., Гарипов К.Х., Шипин А.В. МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ // Научно-технический вестник Поволжья. 2024. № 7. С. 203-205.

УДК 004.942

Самойлов Н.А.

Методические основы математического моделирования дифференциальной гидроочистки дизельного топлива как поликомпонентного реакционного процесса

Самойлов Наум Александрович – д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник;

naum.samoilow@yandex.ru

Научный Исследовательский Проектный Институт нефти и газа «ПЕТОН»,

Россия, Уфа, 450071, просп. Салавата Юлаева. 00Б.

Рассмотрен новый подход к математическому моделированию и аппаратному оформлению процесса гидроочистки. Исходное сырье процесса характеризуется как совокупность ряда узких фракций, в которых суммарное содержание сераорганических компонентов объединено в псевдокомпонент. Предложено разделять исходное сырье на две или три широкие фракции, которые раздельно подвергаются гидроочистке, что уменьшит объем реакторов и загрузку в них катализатора.

Ключевые слова: математическое моделирование реакторов, псевдокомпоненты, кинетика реакции, константа скорости реакции, гидроочистка дизельного топлива.

Methodological foundations of mathematical modeling of differential hydrotreating of diesel fuel as a multicomponent reaction process

Samoilov N.A.

LLC Research and Design Institute of Oil and Gas «PETON», Ufa, Russian Federation

A new approach to mathematical modeling and hardware design of the hydrotreating process is considered. The feedstock of the process is characterizing as a set of a number of narrow fractions in which the total content of organosulfur components which are combined into a pseudo-component. It is proposing to divide the feedstock into two or three broad fractions, which are separately hydrotreated, which will reduce the volume of the reactors and the loading of the catalyst into them.

Keywords: mathematical modeling of reactors, pseudo-components, reaction kinetics, constant reaction rate, hydrotreating of diesel fuel.

Процесс каталитической гидродесульфуризации дизельного топлива, как и большинства вторичных каталитических и термических процессов нефтепереработки, таких как риформинг, крекинг, коксование, окисление битумов, характеризуется поликомпонентностью реакционной системы, в которой одновременно протекают десятки и сотни химических реакций. В свою очередь, в качестве исходных компонентов этого процесса выступают многочисленные сырьевые компоненты различной природы, существенно отличающиеся по физико-химическим параметрам, так и по реакционной активности. Это создает ряд проблем как при формировании математической модели процесса гидроочистки дизельного топлива, так и при ее реализации.

В состав дизельных фракций, вырабатываемых при первичной переработке нефти и получаемых в результате вторичных процессов, обычно содержится от 0.5% до 2% общей серы, входящей в состав различных сераорганических примесей. В соответствии с экологическими требованиями, в результате гидроочистки дизельного топлива содержание общей серы необходимо понизить до 10 мг/кг, то есть снизить 500-2000 раз. Обеспечение такой глубины реакционного процесса обеспечивается ростом времени контакта сырья с катализатором и увеличения его загрузки в реактор. На действующих установках гидроочистки углубление гидроочистки обычно достигается строительством дополнительных реакторов гидрирования или существенным, часто в 2-3 раза, снижением мощности установки.

Число реакторов на установках гидроочистки дизельного топлива достигает восьми, при этом очищаемое сырье гидрируется в реакторах по последовательной или параллельной схеме, встречаются и смешанные схемы, например, сырье сначала подвергается очистке в двух параллельно работающих реакторах, а затем доочищается в одном дополнительном реакторе. Расчеты показали, что процесс гидроочистки сырья во всех вариантах промышленных реакционных блоков протекает идентично очистке сырья в единичном реакторе с загрузкой катализатора равной загрузке во все реакторы.

Многочисленные сераорганические примеси в очищаемом дизельном топливе принадлежат к различным гомологическим рядам (табл.1), при взаимодействии с избытком водорода выделяют

сероводород и отличаются по реакционной активности по отношению к обычно используемому Со-Мо катализатору, из-за различной массы молекул и их строения. Активность десульфуризации гомологов меркаптанов, сульфидов, дисульфидов, тиафенов, бензотиафенов, дибензотиафенов резко падает с последовательным уменьшением значений констант скоростей реакции от меркаптанов к дибензотиафенам.

Определение состава исходного сырья как одной из базовых задач математического моделирования применительно к процессу превращения множества разных сераорганических компонентов, каждый из которых содержится в сырье как микропримесь становится практически нерешаемой задачей. В еще большей мере эта проблема усложняется, когда необходимо выполнить кинетическое исследование гидроочистки дизельного топлива, в ходе которого концентрация микропримесей уменьшается на 2-3 порядка. Хроматографический метод анализа не позволяет получить как качественный, так и количественный покомпонентный состав сырья гидроочистки (рис.1), тем более гидрогенизата, и необходима разработка прецизионных методов анализа. Даже использование специальных комбинированных техник (например, ввод в колонку с сорбентом 1 мл образца дизельного топлива, разбавленного 5 мл н-гексана, затем через колонку пропускали 2 мл гексана с 1 мл смеси гексан-хлористый метилен 10:1, элюируя из сорбата парафины, после чего серосодержащие компоненты элюировали 1 мл хлористого метилена и полученный элюат анализировали на хромато-масс-спектрометре [1]) не позволяет получить полную картину качественного и количественного состава поликомпонентного сырья.

Таблица 1

**Некоторые сераорганические компоненты,
содержащиеся в неочищенных фракциях дизельного топлива**

Сераорганический компонент	Температура кипения, °С	Сераорганический компонент	Температура кипения, °С
Диаллилдисульфид	180	Этилбензотиафены	258+/-9
Фенилвинилсульфид	180	Дигексилсульфид	260
Дибутилсульфид	188	Пропилбензотиафены	274+/-9
Метилфенилсульфид	188	Н-додецилмеркаптан	277
Дипропилдисульфид	196	Бутилбензотиафены	291+/-9
Н-октилмеркаптан	199	Пентилбензотиафен	307
Этилфенилсульфид	204	Гексилбензотиафен	323
Диизопентилсульфид	211	Гептилбензотиафен	329
Н-нонилмеркаптан	220	Дифенилсульфид	294
Бензотиафен	221	Дигептилсульфид	298
Аллилфенилсульфид	224	Пентилбензотиафены	307+/-11
Дипентилсульфид	229	Дифенилдисульфид	310
Дибутилдисульфид	236	Дибензотиафен	333
Н-децилмеркаптан	240	Дибензилсульфид	335
Метилбензотиафены	243+/-9	Метилдибензотиафены	349+/-11
2-фенилтиофен	256	Этилдибензотиафены	359+/-11
Н-ундецилмеркаптан	257	Пропилдибензотиафены	372+/-11

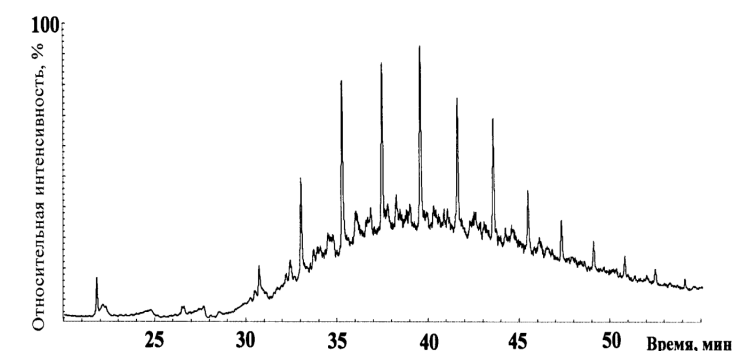


Рисунок 1 - Характерная хроматограмма дизельного топлива

Эффективное решение этой проблемы при математическом моделировании процесса гидроочистки было найдено в формировании модели сырья количественным объединением нескольких реагирующих компонентов в один условный компонент или в псевдокомпонент (в зарубежной литературе используется более удачный термин *lump* – сгусток) с физико-химическими свойствами достаточно близкими свойствам этой группы или усредняющими их (рис.2) [2-6]. Число псевдокомпонентов обычно варьируется от двух (легкогидрируемые и трудногидрируемые псевдокомпоненты) до шести. Часто в качестве псевдокомпонентов рассматривают несколько гомологов, однако единого подхода в решении этой задачи нет. Разные исследователи могут в один псевдокомпонент включать сераорганические примеси различных гомологических рядов [3, 5]. Представление сырья гидроочистки в форме этой модели хотя и позволяет достаточно качественно моделировать процесс, рассчитывать изменение концентраций псевдокомпонентов в расчете на сырье в ходе гидроочистки, однако не дает возможности практически воспользоваться тем, что для компонентов с различной реакционной активностью необходимо разное время пребывания для достижения необходимой глубины гидродесульфуризации. В ходе расчетов процесса по модели на основе псевдокомпонентов не учитывается, что при достижении конечной концентрации сераорганики в катализате на выходе из реактора на уровне 10 мг/кг по общей сере легкогидрируемые компоненты уже полностью подверглись гидрированию, процесс гидроочистки начинает лимитироваться только остатками трудногидрируемых примесей и уже превращенные легкогидрируемые компоненты становятся *балластом* реакционной смеси. Этот фактор приводит к тому, что расчетное (и реальное!) время контакта реакционной смеси в реакторе нерационально увеличивается, приводя к росту объема реактора и загрузки катализатора в реактор, достигающей на мощных установках гидроочистки 200-400 м³.

Рисунок 2 - Преобразование поликомпонентного по серосодержащим примесям сырья гидроочистки дизельного топлива в три псевдокомпонента по признаку гомологического ряда.

Символами , и одного цвета обозначены гомологи одного класса сераорганических примесей, например, сульфиды, с различными температурами кипения и реакционной активностью

Вторым недостатком модели сырья гидроочистки на базе псевдокомпонентов является сложность и трудоемкость аналитики для количественной и качественной оценки сераорганики, входящей в состав конкретного псевдокомпонента.

Этих недостатков лишена новая модель состава сырья гидроочистки по сераорганическим примесям, разработанная совместно с В.А. Жилиной [7], учитывающая фракционный состав сырья и распределение в нем сераорганических примесей. По данной модели (рис.3) сырье рассматривается как последовательный ряд из N узких фракций с объединением совокупности сераорганических примесей в каждой фракции в виде псевдокомпонента с концентрацией его уже не в сырье, а в соответствующей узкой фракции по результатам простого и доступного анализа пробы узкой фракции на общую серу на приборе СПЕКТРОСКАН методом энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии, позволяющем измерять ультранизкие концентрации серы (до 3 мг/кг).

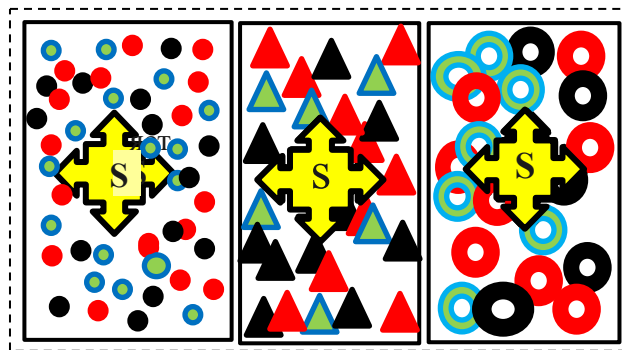


Рисунок 3 - Модель сырья гидроочистки дизельного топлива в виде трех псевдокомпонентов узких фракций, составляющих сырье, с концентрацией серосодержащих веществ, выражаемых в виде общей серы. Обозначения символов на рис.2.

Предлагаемая модель сырья позволяет моделировать гидроочистку каждой узкой фракции как самостоятельного сырья при одинаковых для всех узких фракций условиях реализации процесса и в ходе расчета гидроочистки выяснить в каких узких фракциях сырья в данный момент времени процесс десульфуризации уже завершился, а в каких гидроочистка еще продолжается. В качестве примера на рис.4 приведены результаты расчета кинетики гидроочистки дизельного топлива (фракция 180-360°C), разделенного на 20 узких фракций, наглядно показывающие, что основная масса легких узких фракций за 0.5-1 час подвергается глубокой десульфуризации, а очистка всей массы сырья лимитируется только небольшим числом тяжелых фракций. При объединении всех узких фракций в один общий поток математическое моделирование рассматривает реализацию классической промышленной гидроочистки исходного сырья в единичном реакторе со всеми ранее рассмотренными недостатками, но предложенная модель псевдокомпонента как совокупности сераорганических примесей, выкипающих в узком интервале температур и, соответственно, состоящих из нескольких компонентов, дает возможность решать и другую задачу – объединение нескольких последовательных узких фракций в широкую фракцию и моделировать гидроочистку только этой широкой фракции независимо от гидродесульфуризации остальных фракций сырья, что позволило детально исследовать результативность деления сырья гидроочистки на широкие фракции с последующим их раздельным гидрированием [8, 9].

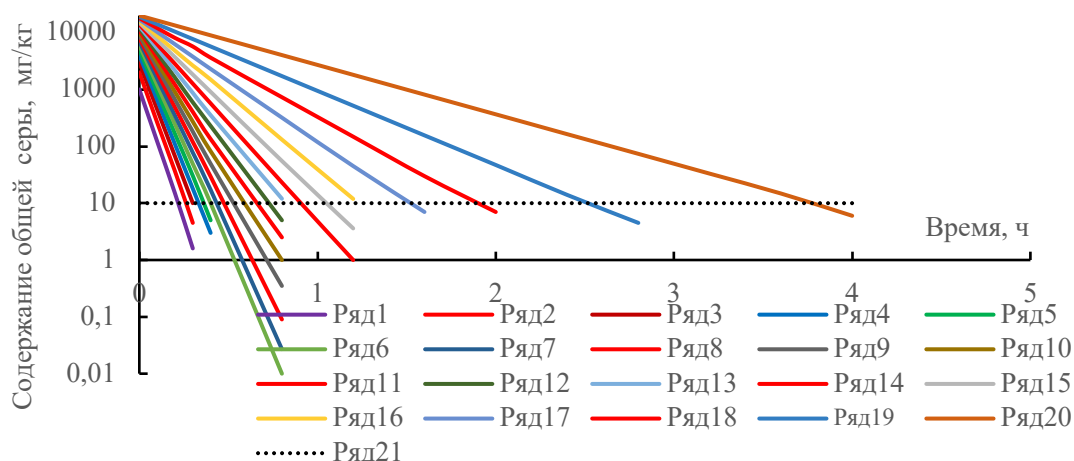


Рисунок 4 - Кинетика раздельной гидроочистки узких фракций сырья
Номера рядов – номера узких фракций с 1 по 20, начиная с самой легкой;
ряд 21 – допустимое содержание общей серы в узких фракциях после гидроочистки – 10 мг/кг

Если в процессе гидроочистки дизельного топлива предварительно разделить сырье, например, в ректификационной колонне, на две широкие фракции, для которых необходима различная продолжительность гидродесульфуризации слагающих их узких фракций, с последующей реализацией раздельного гидрирования каждой широкой фракции в самостоятельном реакторе, формируя реакторный блок из двух реакторов, то появляется возможность реализовать дифференциальную гидроочистку сырья при сохранении остального оборудования установки.

Для выполнения сопоставительного анализа результатов гидроочистки дизельного топлива по двум вариантам – традиционная схема гидроочистки всего сырья в одном реакторе и предлагаемая схема дифференциальной гидроочистки двух фракций сырья в реакторном блоке – была разработана универсальная программа расчета, основанная на математической модели гидроочистки с принятием ряда упрощающих расчет допущений, в частности во всех расчетах были приняты одинаковые технологические параметры процесса, гидродинамика идеального вытеснения, изотермичность, стационарность работы. Базовым элементом программы в таком случае становится расчет изменения концентрации C_i i -го псевдокомпонента i -й узкой фракции сырья, состоящего из N узких фракций, во времени контакта τ по уравнению

$$\frac{dC_i}{d\tau} = -k_i C_i, \quad (1)$$

где k_i – эффективная константа скорости реакции гидродесульфуризации i -го псевдокомпонента при прочих равных входных и выходных параметрах процесса.

Математическая модель реакционного блока состояла из N дифференциальных уравнений вида (1) для каждого из реакторов блока, расчеты выполнялись методом Рунге-Кутты до обеспечения заданной глубины очистки дизельного топлива 10 мг/кг.

Программа последовательно выполняла N вариантов расчета двухреакторного блока гидроочистки при условии, что в первом реакторе гидрируются первые X условно легких узких фракций, а во втором реакторе – последующие условно тяжелые $(N - X)$ узких фракций, пример алгоритма решения задачи приведе для $N=20$ в табл.2. Первые 19 вариантов характеризуют температурную границу деления исходного сырья на две широкие фракции, гидрируемые отдельно, а двадцатый вариант соответствует гидрированию всего сырья в одном реакторе. Критерием эффективности варианта расчета был принят объем катализатора Q , загружаемого в реакционный блок, поскольку чем меньше величина Q при прочих равных входных и выходных параметрах, тем экономичней рассматриваемый вариант работы установки по сравнению с другими вариантами.

Таблица 2

Схема расчета вариантов двухреакторного блока установки гидроочистки дизельного топлива при делении сырья на 20 узких фракций, составляющих широкие легкую и тяжелую фракции

Вариант	X	(N–X)	Вариант	X	(N–X)	Вариант	X	(N–X)	Вариант	X	(N–X)
1	1	2-20	6	1-6	7-20	11	1-11	12-20	16	1-16	17-20
2	1-2	3-20	7	1-7	8-20	12	1-12	13-20	17	1-17	18-20
3	1-3	4-20	8	1-8	9-20	13	1-13	14-20	18	1-18	19-20
4	1-4	5-20	9	1-9	10-20	14	1-14	15-20	19	1-19	20
5	1-5	6-20	10	1-10	11-20	15	1-15	16-20	20	1-20	–

Результаты расчетов показали, что при любом распределении сераорганических примесей в сырье по узким фракциям и любом содержании общей серы в сырье любой вариант разделения исходного сырья на легкую и тяжелую фракции с дифференциальной гидроочисткой является более эффективным, чем гидроочистка сырья в одном реакторе, при этом всегда существует оптимальная граница деления сырья на легкую и тяжелую фракции по узким фракциям, при которой суммарная загрузка катализатора в оба реактора является минимальной (рис. 5), и соответствующая оптимальная температурная граница деления сырья на две широкие фракции в ректификационной фракционирующей колонне.

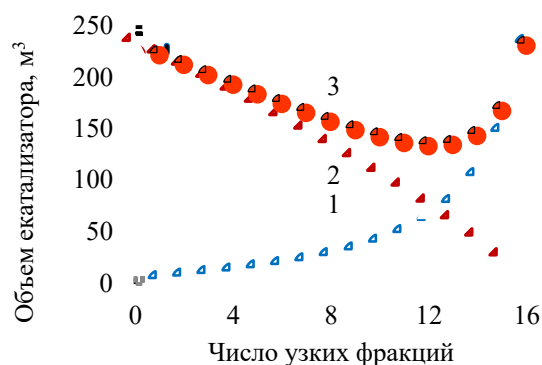


Рисунок 5 - Влияние числа узких фракций, вводимых в состав легкой и широкой фракций на загрузку катализатора в первый реактор (1), второй реактор (2) и суммарно в оба реактора установки гидроочистки (3) при делении сырья на 16 узких фракций и учете, соответственно, 16 псевдокомпонентов.

Дальнейший анализ дифференциальной гидроочистки дизельного топлива в двух реакторах показал, что сохраняются резервы совершенствования процесса: десульфуризация легкой широкой фракции тормозится ее концевыми утяжеленными узкими фракциями, а десульфуризация тяжелой широкой фракции затормаживается ее начальными облегченными фракциями. Объединение этих «неудобных» легких фракций в третью среднюю широкую фракцию с гидрированием легкой, средней и тяжелой широких фракций в отдельных реакторах позволяет дополнительно уменьшить загрузку катализатора в реакционный блок установки [10].

При этом если для двухреакторной схемы всегда существует единственный оптимальный вариант деления конкретного сырья гидроочистки на две фракции по температуре кипения или соответствующему распределению узких фракций (рис. 5), то для трехреакторной системы в зависимости от границ кипения средней широкой фракции формируется ряд локальных минимумов загрузки катализатора и для определения глобального минимума необходим соответствующий перебор узких фракций, формирующих среднюю широкую фракцию.

Дифференциальная гидроочистка при прочих равных условиях процесса позволит существенно увеличить мощность установки или уменьшить загрузку катализатора в реакционный блок. Результаты математического моделирования реакторного блока установки гидроочистки мощностью 800000 т/г показали, что при глубокой десульфуризации дизельного топлива до уровня 10 мг/кг для типового однореакторного блока потребуется загрузка катализатора 237.1 м³, тогда как в случае дифференциальной гидроочистки при делении сырья на две широкие фракции суммарная загрузка катализатора в двухреакторный блок составит 134.2 м³, а при делении сырья на три широкие фракции, гидрируемые в трехреакторном блоке, суммарная загрузка катализатора снизится до 116.3 м³. Таким образом предлагаемые системы дифференциальной гидроочистки позволят почти в два раза уменьшить потребность в катализаторе гидроочистки при сохранении производительности установки и глубины очистки дизельного топлива.

Дальнейшее увеличение числа реакторов в блоке также формально позволяет снизить суммарный объем катализатора, однако при этом прирост эффективности дифференциальной гидроочистки резко снижается: например, при делении сырья на 16 узких фракций с их отдельным гидрированием в 16 реакторах загрузка катализатора в них будет последовательно возрастать от 2.3 м³ в первом реакторе до 23.1 м³ в последнем и полная загрузка катализатора в реакторный блок составит 108.5 м³, что лишь на 7.8 м³ меньше глобального оптимума трехреакторной схемы, приводя при этом к чрезмерному усложнению и удорожанию реакторного блока. Поэтому рекомендуется дифференциальную гидроочистку ограничить двух- и трехреакторными блоками.

Практическая реализация предлагаемой формы дифференциальной гидроочистки дизельного топлива обеспечивается дополнительной ректификационной колонной, с верха которой отбирается легкая широкая фракция, с низа – тяжелая широкая фракция, с средняя широкая фракция при необходимости может отводиться как боковой погон. Предреакторный нагрев широких фракций удобно осуществлять в четырехсекционных цилиндрических трубчатых печах, позволяющих легко формировать необходимую многопоточность нагреваемого продукта.

Предлагаемый метод дифференциальной гидроочистки может быть использован в двух направлениях.

При проектировании новой установки метод позволяет решать задачу снижения загрузки дорогостоящего катализатора в реакторный блок как при оптимальном распределении сырья на широкие фракции в реакторы с различной загрузкой катализатора, так и при близком к оптимальному режиму распределения сырья на широкие фракции, при котором реакторы с одинаковыми габаритами имеют близкую загрузку катализатора с расхождением 3-5%.

При реконструкции действующей установки гидроочистки с несколькими параллельно или последовательно реакторами метод дифференциальной гидроочистки позволит при переобвязке реакторов в схему с отдельным гидрированием широких фракций сырья определить возможность увеличения мощности установок на 30-40% при сохранении прежней загрузки сырья в реакторы.

Заключение

Разработана новая модель состава поликомпонентного сырья гидроочистки дизельного топлива в форме разделения его на узкие фракции, в каждой из которых совокупность гидрируемых сераорганических компонентов рассматривается как псевдокомпонент, концентрация которого определяется простым анализом на общую серу.

Предложена дифференциальная гидроочистка дизельного топлива, при которой исходное сырье делится на две или три широкие фракции с оптимальной температурной границей деления между ними, и последующей отдельной гидроочисткой этих фракций, что позволит при прочих равных условиях увеличить мощность установки или минимизировать загрузку катализатора в реакторный блок.

Список литературы

1. Николаев А.В., Карцова Т.А., Даванков В.А. Газохроматографическое определение серосодержащих компонентов дизельного топлива с использованием твердофазной экстракции и фракционного элюирования. // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2011. – Т. 11. – №4. – С. 459-466.
2. Ghosh P., Andrews A.T., Quann R.Q., Halber T.R. Detailed kinetic model for the hydrodesulfurization of FCC // Naphtha. Energy Fuels. – 2009. – V. 23(12). – P. 5743–5759. DOI: [10.1021/ef900632v](https://doi.org/10.1021/ef900632v)
3. Xun Nang, Shuyuan Li, Changtag Yue, Jilai He, Jili Hou. Lumping kinetics of hydrodesulfurization and hydrodenitrogenation of the middle distillate from chinese shale oil // Oil Shale. – 2013. – V. 30. – № 4. – P. 517–535. DOI: [10.3176/oil.2013.4.05](https://doi.org/10.3176/oil.2013.4.05)
4. Papop Bannatham, Sornsawan Teeraboonthaikul, Tanaree Patirupanon, Wannarat Arkardvipart, Sunun Limtrakul, Terdthai Vatanatham, Palghat A. Ramachandran. Kinetic evaluation for hydrodesulfurization via lumped model in a trickle-bed reactor // Ind. Eng. Chem. Res. – 2016. – V. 55. – № 17. – P. 4878–4886. DOI: [10.1021/acs.iecr.6b00382](https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b00382)
5. Yachen Yin, Wenbin Chen, Guilian Wu, Feng Xin, Kang Qin, Yutao Lu, Le Zhang, Mingfeng Li. Kinetics towards mechanism for ultra-deep hydrodesulfurization and hydrodenitrogenation of diesel // AIChE Journal. – 2022. – V. 67. – № 7. First Published: 18 January 2021. DOI: [10.1002/aic.17188](https://doi.org/10.1002/aic.17188)
6. Tataurshikov A., Ivanchina E., Kruttcova N., Krivtsov E., Syskina A. Mathematical modeling of diesel fuel – hydrotreating // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – V. 27(1). 012046. – P. 1-6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/27/1/012046>
7. Samoilov N.A., Zhilina V.A. On the formation of organosulfur pseudo-components in the raw materials of the diesel fuel hydrotreating process // Progress in Petrochemicals. – 2020. – V.3. – № 5. – P. 800-801.
8. Пат. №2691965 РФ. Способ гидроочистки дизельного топлива / Мнушкин И.А., Самойлов Н.А., Жилина В.А. // Изобретения. Полезные модели. – 2019. – № 17.
9. Samoilov N.A. Mathematical modeling and optimization of diesel-fuel hydrotreating // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2021. – V. 55. – № 1. – Pp. 91-100.
10. Пат. №2798566 РФ. Способ гидроочистки дизельного топлива / Мнушкин И.А., Мальцев Д.И., Самойлов Н.А. // Изобретения. Полезные модели. – 2023. – № 18..

УДК 66.021.1

Сидоров Н. Э., Абиев Р.Ш.

Сравнение интегральных значений скорости диссипации энергии в аппаратах механического перемешивания с центробежно-пульсационными мешалками

Сидоров Н. Э. – аспирант второго курса кафедры Оптимизации химической и биотехнологической аппаратуры; Nikita.E.Sidorov@gmail.com

Абиев Р.Ш. – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой Оптимизации химической и биотехнологической аппаратуры.

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)
Россия, Санкт-Петербург, 190013, Московский проспект 24-26/49

В докладе представлены результаты сравнительной оценки скорости удельной диссипации энергии в аппарате с центробежно-пульсационными мешалками различных модификаций, выполненного путем численного моделирования в модуле вычислительной гидродинамики Comsol Multiphysics 6.2.

Ключевые слова: перемешивание, центробежно-пульсационные мешалки, вычислительная гидродинамика, computational fluid dynamics, Comsol mixing module 6.2.

Comparison of the energy dissipation rate for modifications of centrifugal-pulsed impellers in the stirred tank reactors

Sidorov N., Abiev R.

Saint Petersburg State Institute of Technology, Optimization of Chemical and Biotechnological Equipment

The thesis presents the results of a comparative assessment of numerical modeling of the energy dissipation rate for modifications of centrifugal-pulsed impellers in the stirred tank reactors, performed using the computational fluid dynamics module in Comsol Multiphysics 6.2.

Keywords: mixing, centrifugal-pulsed impellers, computational fluid dynamics, Comsol Mixing Module 6.2.

Введение

Энергоэффективные процессы перемешивания широко востребованы в большинстве отраслей промышленности. Эффективное перемешивание способствует, в первую очередь, интенсификации процессов массопереноса, теплообмена и проведения химических реакций. В подавляющем большинстве, конструктивно эти процессы подразумевают ввод дополнительной энергии в аппарат посредством вращающихся на валу перемешивающих устройств.

Перемешивание с помощью вращающихся на валу перемешивающих устройств относится к классу гидромеханических процессов, в которых гидродинамика оказывает ключевое влияние на показатели качества и скорости получения конечного продукта. Конструкция перемешивающего устройства, характеризующаяся в первую очередь исполнением мешалки, непосредственно участвует в формировании и распределении профилей скоростей и характеристик турбулентного и конвективного переноса, которые непосредственно влияют на эффективность процессов перемешивания. При смешении взаимно растворимых жидкостей эти характеристики непосредственно определяют время гомогенизации. При использовании в качестве рабочих сред гетерогенные системы (жидкость–газ, жидкость–твердое тело, жидкость–жидкость, жидкость–газ–твердое тело), эти характеристики полностью определяют не только процессы формирования гетерогенных систем (получение эмульсий, суспензий, дисперсий и т.д.), но и скорости процессов тепло- и массообмена.

При этом классические мешалки характеризуются создаваемыми направленными движениями жидкости: турбинные – преимущественно радиальным движением, пропеллерные – радиальным и осевым. В работе рассматривается новый тип мешалок – центробежно-пульсационные, которые объединяют в себе как направленное движение жидкости в аппарате (радиальное и осевое), так и пульсации давления и скорости, тем самым диверсифицируя характер воздействия на поток, частично используя преимущества пульсационных аппаратов для перемешивания. Тематика пульсационной аппаратуры для процессов смешения была глубоко исследована начиная с влияния низкочастотных пульсаций на протекание целого широкого спектра процессов химической технологии. С середины 1980-х годов на кафедре Оптимизации химической и биотехнологической аппаратуры Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета) ведется разработка пульсационных аппаратов нового поколения для гетерогенных систем с жидкой сплошной средой [1].

Центробежно-пульсационные мешалки генерируют пульсации за счет определенной геометрии поверхности, преобразуя вращательное движение в локальные импульсы давления. Данные импульсы формируют динамическое поле скорости, которое зависит от амплитуды и частоты, задаваемыми конструктивными особенностями криволинейной поверхности мешалки и непосредственно скоростью вращения. За один оборот мешалки возникает несколько периодов пульсаций, вызванных последовательным изменением амплитуды вертикального смещения полотна мешалки. Турбинная мешалка тоже генерирует пульсационные скорости вследствие конструкции своих лопастей, однако, возникающие пульсации составляют порядка 5-10% от общей угловой скорости вращения вала и ограничено зоной вокруг мешалки.

Комбинируя как пульсации давления и скорости, так и циркуляцию направленных потоков жидкости, ЦПМ позволяет повысить эффективность использования вводимой в аппарат энергии путем частичного (максимально возможного) преобразования вращательного движения мешалок в пульсации давления и скорости в гетерогенной среде, уменьшение рассеяния энергии путем сокращения уровня крупномасштабной турбулентности в объеме аппарата, повышение степени диспергирования капель и пузырей и качества перемешивания внутри них (особенно капель), а также повышения кинетических коэффициентов (коэффициентов тепло- и массопередачи) за счет локализованного преимущественно вблизи мешалки направленного ввода энергии и снижения осевых усилий на валу смесителя [2]. Лопасти мешалки выполнены в виде криволинейной поверхности, описанной по формуле (1).

$$Z(\varphi) = z \cdot \sin(p \cdot \varphi + \psi), \quad (1)$$

где Z - амплитуда вертикального смещения z , м;
 p - число, выбираемое из диапазона чисел 3, 4, 6 или 8;
 φ - полярный угол, отсчитываемый в срединной плоскости мешалки относительно оси вращения мешалки, рад;
 ψ - начальная фаза, рад.

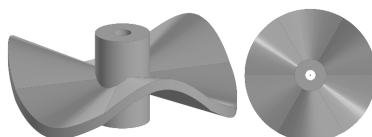


Рисунок 1 - Центробежно-пульсационная мешалка

Целью работы является исследование распределения скорости и удельной диссипации энергии в рассматриваемых модификациях базовой мешалки ЦПМ, представляющих расположение отверстий в полотне мешалок. Данные гидродинамические характеристики являются ключевыми для интенсификации процессов перемешивания: удельная диссипация энергии интенсифицирует процессы эмульгирования и диспергирования, в то время как равномерное распределение скорости в аппарате является важным параметром процессов суспендирования.

Экспериментальная часть

В качестве аппарата смешения в рассматриваемой работе использовался цилиндрический сосуд с эллиптическим дном и внутренними перегородками. Реактор смешения был спроектирован с нуля, так как в стандартной форме приложения модуля mixing отсутствует возможность добавлять перемешивающие устройства нестандартной формы, отличные от типовых лопастных, турбинных и прочих мешалок. Основные параметры реактора приведены в таблице №1 и на рис. 2.

Таблица 1

Основные параметры аппарата смешения ЦПМ

Параметр	Обозначение	Значение
Диаметр реактора	D	300 мм
Высота реактора	H	450 мм
Количество перегородок	N	4
Ширина x длина перегородки	W x L	10 мм x 20 мм
Высота нижней мешалки от отметки дна реактора	Z	80 мм

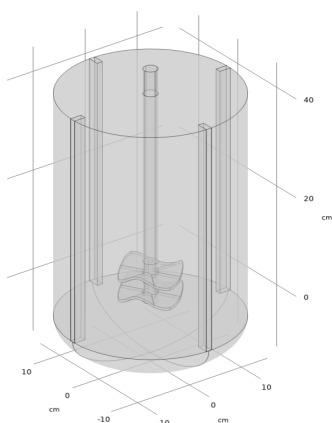


Рисунок 2 - Реактор перемешивания, оборудованный центробежно-пульсационными мешалками

В работе моделирование процессов осуществлялось на базе программного продукта вычислительной гидродинамики Comsol Multiphysics 6.2, модуль mixing. Для моделирования была выбрана модель k-ε RANS, которая, являясь универсальным решением подобных задач, эффективно описывает усредненные характеристики турбулентных потоков, сохраняя баланс между вычислительной сложностью и точностью, и не требует значительных вычислительных мощностей.

Модель k-ε RANS основана на уравнениях Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу. Основные уравнения модели включают:

Усредненные уравнения Навье–Стокса:

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{\mathbf{u}}) = 0, \quad (2)$$

Уравнение импульса:

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \bar{\mathbf{u}})}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{\rho} \bar{\mathbf{u}} \bar{\mathbf{u}} = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \bar{\rho}) + F, \quad (3)$$

где эффективная вязкость $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$

Турбулентная вязкость:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (4)$$

где k – турбулентная кинетическая энергия, ε – скорость диссипации энергии турбулентности.

Уравнения переноса, характерные для k-ε модели, где k – турбулентная кинетическая энергия, ε – скорость диссипации энергии:

Турбулентная кинетическая энергия, k:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U_i k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon, \quad (5)$$

Скорость диссипации энергии, ε:

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U_i \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (6)$$

где $C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ – эмпирические константы, а P_k – генерация турбулентной кинетической энергии, равное:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial \bar{x}_j} \cdot \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial \bar{x}_i} \right), \quad (7)$$

Были проанализированы 28 модификаций центробежно-пульсационных мешалок в дополнение к двум базовым и турбинной мешалке, являющейся отраслевым ориентиром мешалок быстрого типа. Были проанализированы уровень создаваемой турбулентности в аппаратах и

распределение линий тока жидкости, а также дана количественная оценка результатов моделирования значений удельной диссипации энергии в аппарате по формуле (8), являющейся основополагающим параметром работы мешалок, характеризующим качество процессов диспергирования и эмульгирования при перемешивании гетерогенных сред.

$$\varepsilon_{av} = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon(x, y, z) dV, \quad (8)$$

Полученные лучшие результаты мешалок показаны на рис. 3.

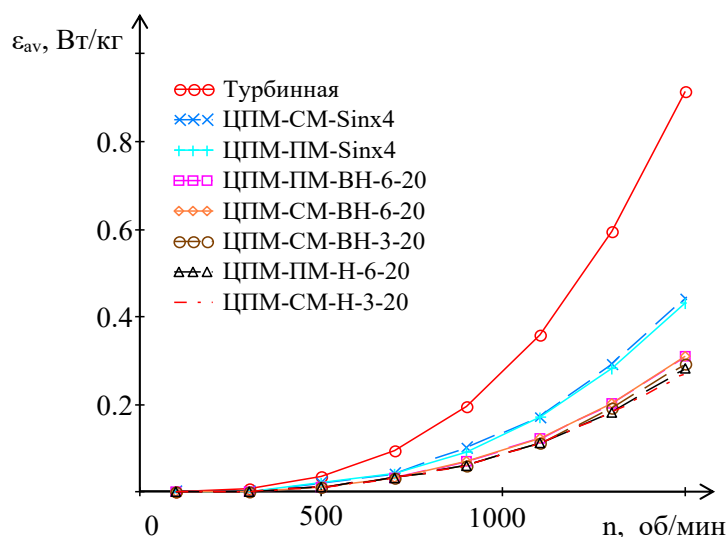


Рисунок 3 - Распределения средней скорости диссипации энергии по аппарату

Заключение

В результате были выявлены оптимальные модификации центробежно-пульсационных мешалок, которые превосходят базовые. Как следует из приведенных данных, в части распределения средней скорости диссипации энергии, турбинная мешалка превосходит все вариации центробежно-пульсационных мешалок. Среди ЦПМ лучшие показатели у мешалки с четырьмя синусоидальными периодами описания криволинейной поверхности полотна. Далее следуют мешалки синфазного и противофазного расположения с шестью отверстиями по 20 мм в диаметре – мешалки, имеющие наибольшую суммарную площадь отверстий в рассматриваемом исследовании.

Список литературы

1. Абиев Р. Ш. Пульсационные аппараты нового поколения – энерго- и ресурсосберегающее оборудование химических производств // Химическая промышленность сегодня. – 2008. – N 4. – С. 46-54.
2. Абиев Р.Ш. Пульсационно-центробежный смеситель. Патент на изобретение RU 2379098 С1, 20.01.2010. Заявка № 2008142995/15 от 29.10.2008.

Разработка в системе Компас 3D, изготовление и испытание опытного образца аппарата с уплотнением основных рабочих элементов по типу «плоскость-плоскость»

Силина Александра Михайловна – студентка, asiilina23@gmail.com

Хаванская Евгения Олеговна – студентка, havanskayae@mail.ru

Захаров Станислав Леонидович – д.т.н., доц., проф. Каф. Инженерного проектирования технологического оборудования, staszaharov@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В тезисах рассмотрен вариант проектирования в 3D опытного образца аппарата с уплотнением основных рабочих элементов по типу «плоскость-плоскость» в системе Компас, который предваряет вариант проектирования в системе Solidworks Flow simulation с целью выявления в последующих разработках температурно-гидродинамических застойных зон.

Ключевые слова: система компас 3D, проектирование 3D, аппарат типа «плоскость-плоскость».

Development in the Kompas 3D system, production and testing of a prototype of the device with compaction of the main working elements of the "plane-plane" type

Silina A.M., Havanskaya E.O., Zakharov S.L.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation.

The theses considers a design option in 3D of a prototype of a device with compaction of the main working elements according to the "plane-to-plane" type in the Compass system, which precedes a design option in the Solidworks Flow simulation system with the aim of identifying temperature-hydrodynamic stagnant zones in subsequent developments.

Key words: Compass system 3D, 3D design, "plane-plane" type apparatus.

Введение

Аппарат с уплотнением основных рабочих элементов по типу «плоскость-плоскость» находит все большее применение в отечественном аппаратостроении, поскольку аппараты подобного типа просты в обращении, легко подвергаются промывке отдельных элементов аппарата, которые требуют щелочных или кислотных сред. Эти среды могут деформировать герметизирующие элементы уплотнения. Аппараты типа «плоскость-плоскость» найдут широкое применение в химической, нефтегазовой, фармацевтической и пищевой промышленности, обеспечивая эффективное выполнение сложных технологических процессов.

Экспериментальная часть

В процессе проектирования аппаратов [1-4] у нас возникла необходимость выбора специализированного программного обеспечения. Выбор инструментария проектирования играет ключевую роль в обеспечении точности расчетов, моделирования поведения аппарата под воздействием высоких давлений и, в конечном итоге, в гарантировании безопасности и надежности конструкции. В рамках данного исследования в качестве основной платформы проектирования мы выбрали из серий других программ обеспечений систему автоматизированного проектирования "Компас-3D". Данный выбор обусловлен рядом факторов, среди которых доступность программного продукта для студентов всех курсов, интуитивно понятный интерфейс и обширный набор инструментов для создания трехмерных моделей. "Компас-3D" позволяет осуществлять параметрическое моделирование, что упростило нам внесение изменений в конструкцию и анализ различных вариантов исполнения аппарата. Кроме того, важным преимуществом выбранной системы является возможность интеграции с другими программными комплексами, в частности, с системой конечно-элементного анализа SolidWorks Flow Simulation. Планируется, что в последующих работах будет проведено численное моделирование с использованием SolidWorks Flow Simulation для определения температурно-гидродинамических характеристик проектируемого аппарата и, в частности, для выявления потенциальных застойных зон, которые могут негативно повлиять на работоспособность и долговечность конструкции. Такой комплексный подход к проектированию позволит получить всестороннюю оценку характеристик аппарата с уплотнением основных рабочих элементов и оптимизировать его конструкцию с учетом всех эксплуатационных факторов.

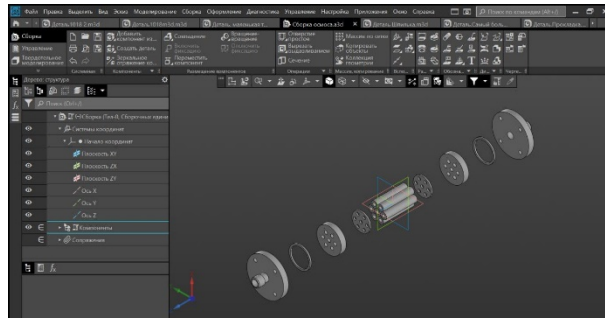


Рисунок 1 - Схема структурная опытного образца аппарата с уплотнением основных рабочих элементов по типу «плоскость-плоскость» в системе Компас 3D

На рис. 1 представлена трёхмерная структурная схема проектируемого аппарата. Схема включает в себя ключевые конструктивные элементы, обеспечивающие функциональность устройства. Основным рабочим элементом аппарата являются пористые полупроницаемые поверхности, реализованные в виде трубок из пористого титана. Данные трубки, обладающие заданной пористостью и проницаемостью, объединены в кластер, состоящий из нескольких десятков элементов. Такая конфигурация позволяет максимизировать площадь поверхности взаимодействия рабочих сред. Герметизация пористых трубок, критически важная для обеспечения работоспособности аппарата под высоким давлением, достигается посредством торцевого уплотнения с использованием фланцевых соединений, стягиваемых шпильками. Для предотвращения деформации пластинчатой прокладки и обеспечения равномерного распределения давления при затяжке фланцев, между торцами трубок и фланцевыми дисками установлены специальные прокладки. В качестве уплотнительного элемента выбрана прокладка типа «Тор-кольцо», зарекомендовавшая себя как надежное решение для герметизации соединений в условиях высокого давления, вплоть до 27,0 МПа.

Подача исходного раствора в аппарат осуществляется через приварные штуцеры или посредством сварки труб конической формы к специально предусмотренным выступам на фланцах.

В процессе проектирования аппарата для создания заранее спроектированных элементов изделия, а также стандартных элементов, фланцы и диски из справочных данных нас не удовлетворили, поскольку они были громоздкими и металлоемкими, поэтому мы спроектировали их самостоятельно. Болты, гайки и шпильки, мы использовали из специализированного справочника стандартных изделий, поскольку они удовлетворяли условиям (рис.2).

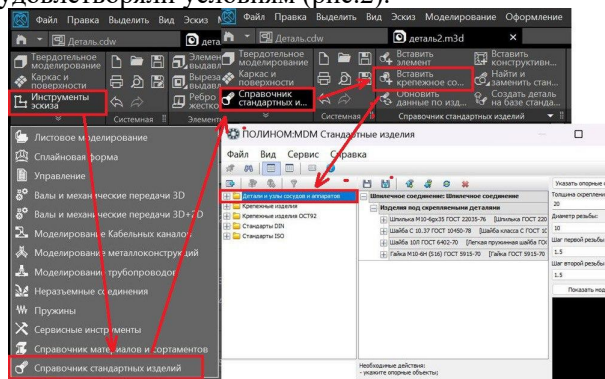


Рисунок 2 - Подбор стандартных и заранее спроектированных элементов изделия

Применение стандартных изделий из унифицированной библиотеки крепежных элементов при проектировании аппарата высокого давления гарантирует нам соответствие конструкции действующим нормам и стандартам, что является критическим фактором для обеспечения надежности и безопасности эксплуатации в условиях повышенных нагрузок. Стандартизация крепежных элементов не только упростила процессы сборки и технического обслуживания, но и существенно облегчила проведение расчетов прочности, минимизируя риски, связанные с несовместимостью компонентов. Использование стандартных элементов позволило применить уже имеющиеся расчетные методики и справочные данные для определения напряженно-

деформированного состояния конструкции, что повысило точность и достоверность прочностных расчетов. Это, в свою очередь, поспособствовало увеличению долговечности и повышению уровня безопасности эксплуатации аппарата. Кроме того, применение стандартных крепежных элементов, обеспечит взаимозаменяемость деталей, что упростит ремонт и техническое обслуживание аппарата.

На рис. 3 представлено изображение полностью собранного высоконапорного аппарата типа «плоскость-плоскость» в двух вариантах: в полном формате и с разрезом, выполненным в четверти модели. Визуализация аппарата в полном формате позволила нам оценить его общую компоновку и габаритные размеры. Разрез, выполненный в четверти модели, предоставляет детальную информацию о внутренней структуре аппарата, включая расположение крепежных элементов, уплотнений и других ключевых компонентов. Такое представление модели способствовало более глубокому пониманию принципов работы аппарата и особенностей его конструкции. Применение в работе современных методов трехмерного моделирования позволяет нам наглядно продемонстрировать сложные технические решения и обеспечить высокую информативность представляемых материалов.

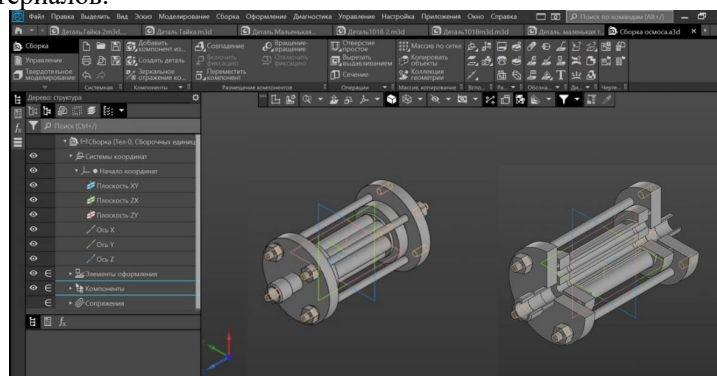


Рисунок 3 - Модель аппарата с уплотнением основных рабочих элементов по типу «плоскость-плоскость» в системе Компас 3D в общем виде и с вырезом 1/4 изображения

Оптимизированная модель аппарата, предназначенная для эксплуатации в условиях повышенных давлений, представлена на рис. 3. Данная конфигурация была выбрана нами в результате тщательного анализа и сравнительной оценки нескольких альтернативных вариантов. Ключевыми критериями отбора являлись простота в обращении и надежность в эксплуатации. Представленная на рис. 3 модель демонстрирует общую компоновку аппарата. Для более детального изучения внутренних конструктивных элементов, на рис. 4 представлена четверть-сечение модели, разработанное в системе трёхмерного моделирования Компас 3D. Применение современных методов компьютерного моделирования позволило нам существенно сократить время и затраты на разработку и изготовление опытных образцов, а также минимизировать риски, связанные с возможными ошибками проектирования.

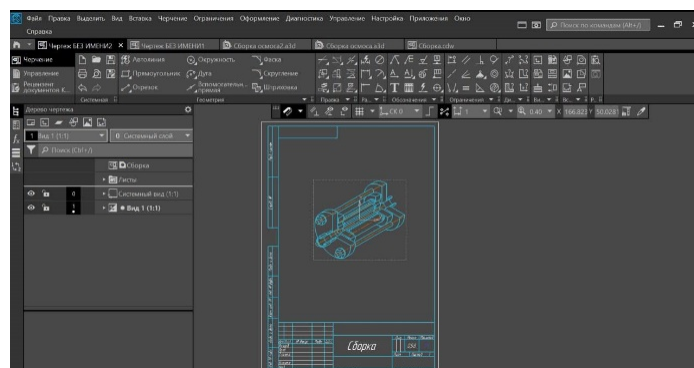


Рисунок 4 - Аппарат, разработанный в системе Компас 3D с разрезом 1/4

Трёхмерная визуализация модели аппарата обеспечила нам всестороннее изучение его конструкции в собранном состоянии, предоставляя возможность детального анализа пространственного расположения компонентов и их взаимодействия. Выполненный разрез модели (рис. 4) позволил визуализировать внутреннюю архитектуру устройства, включая основные

функциональные элементы, представленные трубками цилиндрической формы. На рис. 4 демонстрируется метод соединения данных трубок с промежуточными дисками или фланцами. В качестве уплотнительных элементов мы использовали прокладки, которые обеспечивают необходимый уровень герметичности соединения, предотвращают утечки рабочей среды и поддерживают требуемые параметры давления внутри аппарата. Выбор типа и материала прокладок определяется специфическими условиями эксплуатации, такими как рабочее давление, температура и химический состав рабочей среды. Применение трёхмерного моделирования позволяет не только визуализировать конструкцию, но и проводить виртуальные испытания на герметичность, моделируя различные условия эксплуатации и оценивая эффективность выбранных уплотнительных решений. Это позволяет оптимизировать конструкцию и обеспечить её надёжность и безопасность.

Первоначально нами рассматривался вариант конструкции с использованием болтов для соединения элементов. Однако, данный вариант был признан неприемлемым в связи с повышенной металлоёмкостью, что противоречило требованиям заказчика к минимальной массе аппарата. В результате анализа и оптимизации, в окончательной конструкции (рис. 4) болты были заменены нами на шпильки, а толщину пластин и фланцев уменьшили до минимально допустимых значений, рассчитанных исходя из требований механической прочности. При этом, для обеспечения необходимой прочности и надёжности соединения в условиях повышенных нагрузок, шпильки подвергались специальной термической обработке (закалке), которая недопустима для болтов из-за риска их разрушения. Трёхмерная модель (рис. 4), благодаря своей наглядности и информативности, послужила нам основой для автоматического создания ассоциативного чертежа, что значительно упростило процесс документирования и подготовки к производству. Использование ассоциативных чертежей обеспечивает согласованность между трёхмерной моделью и двумерной документацией, что минимизирует вероятность ошибок и повышает эффективность проектирования.

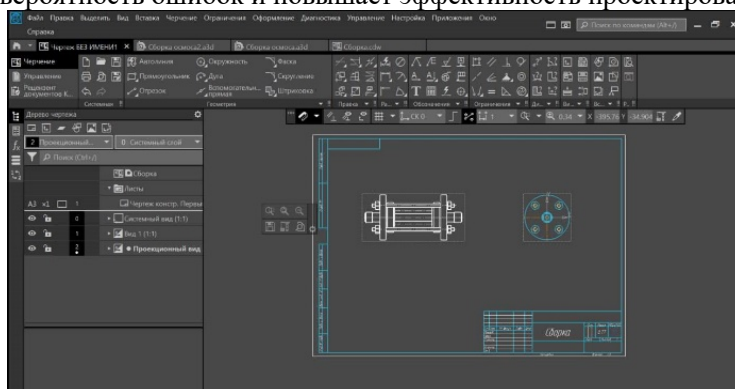


Рисунок 5 - Чертеж 2D, полученный ассоциативным способом в системе Компас 3D

На рис. 5 представлено детальное изображение аппарата с уплотнением основных рабочих элементов по типу «плоскость-плоскость», сконструированного нами в формате 2D-сборки на основе разработанных чертежей. Испытания продемонстрировали нам высокую эффективность данного аппарата, несмотря на нестандартное решение, примененное в конструкции торцового уплотнения. Выбор данной конфигурации уплотнения позволил снизить нам металлоемкость и габариты аппарата без ущерба для герметичности, что является актуальной задачей современного аппаратостроения. Кроме того, аппарат продемонстрировал нам стабильную работоспособность в условиях эксплуатации с органическими средами. Полученные результаты испытаний подтвердили целесообразность применения выбранного технического решения для торцового уплотнения.

Заключение

Применение системы трёхмерного моделирования Компас 3D для проектирования опытного образца аппарата с уплотнением основных рабочих элементов по типу «плоскость-плоскость», обеспечивает создание высокоэффективных и надежных конструкций, соответствующих современным промышленным стандартам и требованиям. Инструментарий данной системы предоставляет широкие возможности для удобного и качественного проектирования аппаратов подобного типа, включая инструменты для моделирования сложных геометрических форм, анализа прочности и проведения виртуальных испытаний. Использование трехмерного моделирования позволило нам существенно сократить время разработки, оптимизировать конструкцию и повысить точность проектирования.

Список литературы

1. Дытнерский Ю.И., Борисов Г.С. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию. 2-е издание, перераб. и доп. М.: Химия, 1991. -493 с.
2. Каграманов Г.Г., Фарносова Е.Н., Голованева Н.В. Нанофильтрационная очистка воды от солей жесткости // Вода: химия и экология. 2014. №5. С. 36-41.
3. Свитцов А.А., Григорьев В.С., Федотов А.В. Технология мембранной очистки сточных вод с применением адсорбентов// Химия и технология воды. 2018. Т.40, №5. С. 564-572.
4. Захаров С.Л., Савков И.М., Кузнецова Е.Н., Моргунова Е.П., Афанасьева А.В. Разработка схемы установки для регенерации полупроницаемых поверхностей с высокими характеристиками разделения. Материалы Конгресса РХТУ им. Менделеева 2016г. 131-133 с.

Султанов Ж.В., Хакимова Г.Н, Нурмухамедов С.Х., Абдуллаев А.Ш., Матчанов Ш.К.

Эффективность измельчения угля Шаргунского месторождения в аппаратах турболопастного типа

Султанов Жавохир Валижонович - соискатель; sv8904@gmail.com

Ташбаев Тохир Эшкузиевич. аспирант, Ташкентский химико-технологический институт, Узбекистан, Ташкент

Нурмухамедов С.Х. к.т.н., ведущий. специалист, АО «Махам - Чирчик», Узбекистан г.Чирчик.

Хакимова Гулноз Нигмановна - к.т.н. проф;

Абдуллаев Алишер Шоназарович - к.т.н. доц.;

ТашХТИ, Узбекистан, г.Ташкент ул.Мирзо Улугбека, д-41.

Матчанов Шерзод Комилжонович. к.т.н. доц. УГУ, Узбекистан, г. Ургенч, ул.Х.Алимджана-14.

В тезисе рассмотрены процесс измельчения как ключевой этап переработки твердого топлива для энергетики, химической и горно-металлургической промышленности. Особое внимание уделено необходимости модернизации угольных ТЭС с учетом экологических норм и ресурсосбережения. Рассматриваются перспективные методы переработки низкосортного угля, включая газификацию, пиролиз и подземную газификацию, позволяющие получать ценные химические продукты и энергию. Анализируются существующие технологии измельчения, включая механическое дробление, аэродинамическое разрушение и электрогидравлический эффект, а также представлена экспериментальная установка турболопастного типа, обеспечивающая высокую степень измельчения. Отмечено, что улучшение фракционного состава угля способствует повышению эффективности его сжигания и снижению выбросов вредных веществ. Рассмотрены исследования, направленные на повышение эффективности газификации и оптимизацию процесса измельчения для глубокой переработки твердого топлива. В статье представлен кольцевой измельчитель с вращением валов и стержней, который работает на основе двигателя постоянного тока с частотным преобразователем. Исследования бурового угля Ангренского месторождения, в которых особые конструкции с зонами мгновенного шага размещения стержней обеспечивают высокую степень измельчения. При угловой скорости $162,4 \text{ c}^{-1}$ фракционный состав угля значительно ограничивается, с долей частиц менее 0,05 мм до 37,3% и долей до 0,08 мм до 59,7%. Результаты подтверждают, что угловая скорость рабочей нагрузки и структура зоны минерализации оказывают решающее влияние на эффективность процесса.

Ключевые слова: уголь, измельчение, гранулометрический состав, фракция.

Efficiency of coal grinding from the Shargunskoye deposit in turbo-blade type devices

Sultanov J.V.¹, Khakimova G.N.¹, Nurmukhamedov S.Kh.¹, Abdullaev A.Sh.¹ Matchanov Sh.K.²

¹ Tashkent Institute of Chemical Technology, Uzbekistan, Tashkent

²USU, Uzbekistan, Urgench, Kh.Alimdzhani street-14

The these discusses the grinding process as a key stage in the processing of solid fuels for the power engineering, chemical and mining and metallurgical industries. Particular attention is paid to the need to modernize coal-fired thermal power plants taking into account environmental standards and resource conservation. Promising methods for processing low-grade coal are considered, including gasification, pyrolysis and underground gasification, which make it possible to obtain valuable chemical products and energy. Existing grinding technologies are analyzed, including mechanical crushing, aerodynamic destruction and electrohydraulic effect, and an experimental turboblade-type installation providing a high degree of grinding is presented. It is noted that improving the fractional composition of coal contributes to increasing the efficiency of its combustion and reducing emissions of harmful substances. Research aimed at increasing the efficiency of gasification and optimizing the grinding process for deep processing of solid fuels is considered. The article presents a ring grinder with rotating shafts and rods, which operates on the basis of a DC motor with a frequency converter. Research of the Angrenskoye deposit drilling coal, in which special designs with zones of instantaneous step of placement of rods provide a high degree of grinding. At an angular velocity of 162.4 s^{-1} the fractional composition of coal is significantly limited, with the share of particles less than 0.05 mm to 37.3% and the share of up to 0.08 mm to 59.7%. The results confirm that the angular velocity of the working load and the structure of the mineralization zone have a decisive influence on the efficiency of the process.

Keywords: coal, grinding, granulometric composition, fraction.

Введение

Процесс измельчения — это важный и ключевой этап в переработке и использовании в энергетике, химической, горно-металлургической и других предприятиях различных отраслей и экологии.

В последнее время актуальным становится проблема создания энергоэффективных и ресурсосберегающих угольных ТЭС нового поколения, а также модернизация существующих станций, отвечающие самым строгим нормам экологической чистоты выработки электроэнергии и тепла с утилизацией образующихся отходов [1].

Общеизвестно, что к низкосортным углям относят все количества бурых углей и часть каменных углей с зольностью свыше 25%. Переработка низко реакционного топлива с целью получения энергии методом газификации является весьма перспективным направлением, способным обеспечивать высокую эффективность и высокие энергетические показатели производства.

Идея о необходимости и эффективности предварительной переработки твердого топлива перед его сжиганием сформулирована учеными еще в начале XX века, а первым создал условия для ее практической реализации акад. Г.М. Кржижановский [2].

Затем Чуханов З.Ф. обосновал и разработал процесс высокоскоростного пиролиза твердого топлива (угля, торфа, горючих сланцев), показав его высокую эффективность в первую очередь при реализации на базе крупномасштабных потребителей твердого топлива, какими являются электрические станции. Подобная переработка топлива позволяет наиболее экономичным образом извлекать или получать из него ценные продукты: газ пиролиза, на 30-40% состоящий из непредельных углеводородов - главного сырья современной химии пластиков, ныне получаемого из природного газа и нефти, и смолопродукты, из которых можно получить различные виды моторного топлива и жидкое котельное топливо - аналог мазута [2, 3].

Настоящее время — это не только источник энергии и необходимо подвергать глубокой и полной переработке, разделив его потенциальную химическую энергию в равных долях между энергетической (электричеством и теплом) и химической продукцией.

На сегодняшний день у нас в стране свыше 10 химических и газоперерабатывающих предприятий, следовательно способ газификации твердого топлива является наиболее оптимальным и целесообразным.

Основными направлениями переработки бурых углей являются: механическое и; термическое обогащение; сжигание; термолиз (полукоксование и коксование); газификация; гидрогенизация; экстракция и термическое растворение; производство адсорбентов. Для успешной организации любого из вышеперечисленных способов необходима предварительная переработка твердых топлив, в частности, измельчение.

В настоящее время предложены разнообразные методы газификации, отличающиеся, главным образом, крупностью перерабатываемого твердого топлива, способом его подачи в газогенератор, температурой газификации, давлением в газогенераторе, составом дутья, а также проведением процесса без подачи тепла из постороннего источника и с подачей тепла — соответственно, адиабатические и аллотропические процессы [4, 5].

В работе Кабанова И.Г. проводятся основные направления переработки углей: механическое обогащение; сжигание; термолиз; газификация; гидрогенизация; экстракция и термическое растворение; производство сорбентов [3].

Работа Пряткина В.С. с сотрудниками [2] посвящена методу газификации низкорективного твердого топлива в восходящем потоке, активированного нанокатализаторами окислителя, а исследования Шпирт М.Я. — математическому моделированию данного процесса и разработке установки, реализующая данный метод [6, 7, 8].

Мессерле В.Е. с сотрудниками провели численные эксперименты по плазменной газификации угля в различных газифицирующих агентах (воздух, диоксид углерода, кислород и смеси пара с воздухом, пара с кислородом, пара с диоксидом углерода) с использованием программы Plasma-Coal. [9].

Ольховский Г.Г. и сотрудник изучили воздушную газификацию углей горновым методом и проанализировали пыле- и сероочистку генераторного газа, а также его сжигание в газотурбинной камере с применением технологических мер по подавлению выбросов NO_x [10]. Исследованиями выявлено, что данная технология газификации углей экономична и проста, а коэффициент полезного действия составляет 44%. Однако, остается проблема переработки высокосернистых углей и связанный с ним процесс очистки сульфида водорода.

Ремезов А.В. и Ермак В.В. исследовали «подземную газификацию углей» как альтернатива существующим технологиям добычи угля [11], Крейнин Е.Г. предлагает несколько вариантов «подземной газификации углей» (ПГУ), в частности, очищенный газ ПГУ не содержит сероводород, а следовательно, при сгорании не выделяет сернистого ангидрида; в газе, полученном на кислородном дутье, не содержится оксидов азота [12].

В промышленности также используются методы, основанные на ударе и разрезании. Кроме вышеперечисленных методов измельчения существуют: способ аэрошелушения, метод циклических изменений давления среды, метод мгновенного снятия избыточного давления пара, электрогидравлического эффекта и т.д. [13, 14]. Но, в настоящее время, ни один из методов не нашел промышленного применения вследствие невозможности достижения полного раскалывания или больших энергетических затрат.

Одним из перспективных методов измельчения твердых материалов является измельчение в аппаратах турболопастного типа [14], который горизонтального исполнения и установлен на двух опорах.

Для экспериментального исследования спроектирована установка для измельчения твердых тел, которая состоит из цилиндрического аппарата с вращающимся валом со стержнями, двигателя постоянного тока с системой управления с частотным преобразователем и измерительных средств. Отличительная особенность данного измельчителя в том, что процесс протекает в зонах с различным шагом размещения стержней, что позволяет достичь высокой степени измельчения.

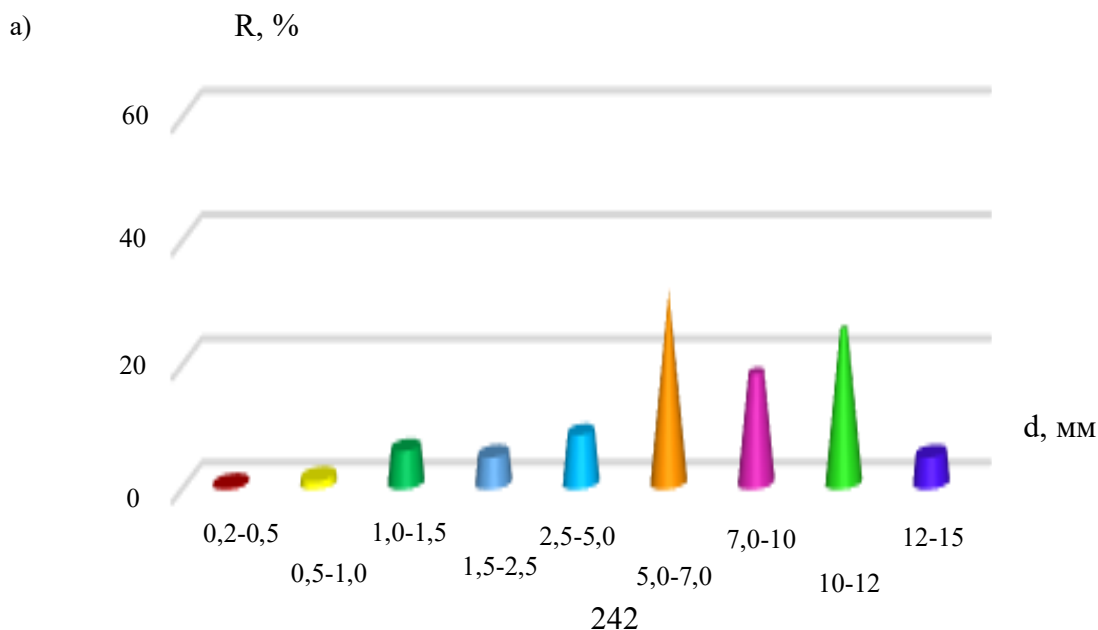
Состав исходного сырья состоит из 9 фракций, что приводит к снижению процесса сжигания. Естественно, для эффективного и полного сжигания твердых углеводородов необходимо улучшить фракционный состав путем измельчения.

Экспериментальная часть

Экспериментальные исследования по измельчению твердых топлив местных месторождений проведены с бурым углем Ангренского месторождения (рис.1).

Фракционный состав исходного угля который подлежит измельчению перед загрузкой имеет следующий состав: фракция $\leq 1,0$ мм составляет 1,5%, доля фракции 1,0-2,5 мм 11,0%, фракция в интервале 2,5-5,0 мм составляет 8,5%, доля 5,0-7,0 мм соответственно 31,0%, доля фракции 7,0-10,0 мм 18%, доля фракции 10,0-12,0 мм 25,0%, фракция в интервале 12,0-15,0 мм составляет 5,0% (рис.1а).

Измельчение бурого угля в турболопастном аппарате позволило получить положительные результаты (рис.1б). Процесс произведен при угловой скорости рабочего вала $\omega = 162,4 \text{ с}^{-1}$. Как видно из графика, фракционный состав бурого угля относительно исходного существенно улучшился и распределение частиц по фракциям имеет следующий состав: фракция до 0,05 мм составила 37,3%, доля фракции до 0,08 мм - 22,4%, фракция до 0,16 мм составила 16,1%, доля фракции 0,16-0,315 мм - 10,75%, доля фракции 0,315-0,5 мм - 12,5%, а фракция из частиц до 1,5 мм - 0,95%. Причем доля фракций до 0,08 мм равна 59,7%.



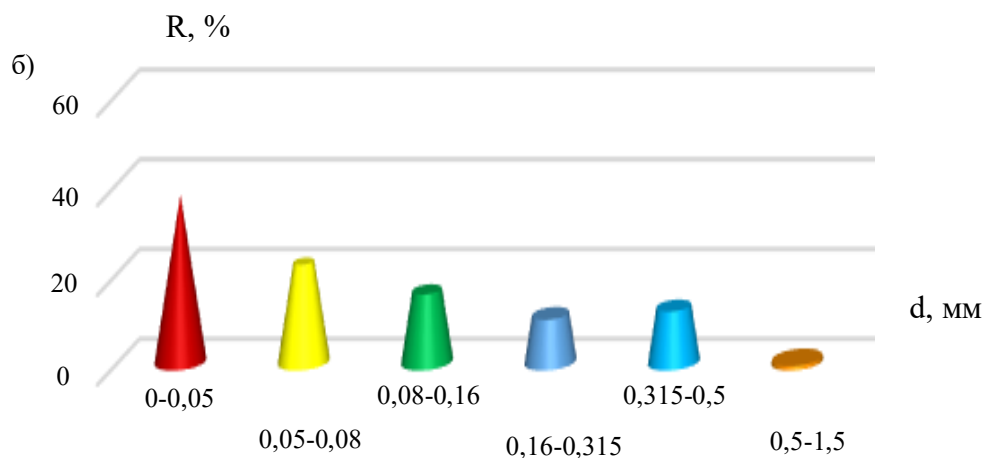


Рисунок 1 - Фракционный состав исходного (а) и измельченного (б) бурого угля в турболлопастном измельчителе

Заключение

Анализ полученных результатов по измельчению твердого углеводородного топлива выявил доминирующее влияние угловой скорости рабочего вала на эффективность процесса измельчения.

В заключении необходимо отметить тот факт, что наличие последовательно расположенных зон измельчения с различным шагом размещения измельчающих стержней является основой повышения степени измельчения. Причем, стержни остроконечные и с переходом в последующую зону угол заостренности увеличивается. Рост угла стержней приводит к увеличению поверхности трения, что также положительно влияет на измельчение истиранием.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия России в период до 2030 года // Приложение к общественно-деловому журналу “Энергетическая политика”. – М.:ГУ ИЭС, 2010.-184 с.
2. Пряткин В.С., Белов А.А., Иванов В.В. и др. Газификация угля и ее применение в энергетике // Известия ВУзов технические науки “Энергетика”, 2018. – №3. – с.42-47.
3. Кабанов И.Г. Методы и способы получения синтетического газообразного и жидкого топлива на основе химической переработки угольного минерального сырья // Вологодские чтения, 2009. - №4. – с.24-26.
4. Efimov N.N. et.al. Simulation of the process of gasification of low-reaction coal in a ring flow // Ugol, 2015. - №9. - p.88–91.
5. Efimov N.N., Belov A. A, Shaforost D.A., Fedorova N.V., Pryatkina V.S. The Mathematical Model of the Coal Gasification Process in a Flow // Modern Applied Science, 2015. - vol. 9. - No.2. -p.223 – 227.
6. Каталог “Основные процессы термохимической переработки углей”. – Горлов Е.Г., Малолетнев А.С., Скрипченко Г.Б. и др. -М.: Трэк, 2005. – 294 с.
7. Шпирт М.Я., Скачкова Е.С. Перспективы использования газификации низкосортных углей, органоминеральных отходов добычи и обогащения каменных углей // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2014. - №1. - с.295-303.
8. Шпирт М.Я., Артемьев В.Б., Силютин С.А. Использование твердых отходов добычи и переработки горючих ископаемых. - М.: Трэк, 2013. – 423 с.
9. Мессерле В.Е., Умбеткалиев К.А., Устименко А.Б. Плазменная газификация угля в различных средах // Горение и плазмохимия, 2022. – №20. – с.219-217.
10. Ольховский Г.Г., Сучков С.И., Епихин А.Н., Крылов И.О. и др. Исследование системы газификации углей с высокотемпературной очисткой генераторного газа // Теплоэнергетика, 2006. - №7. – с.67-73.

11. Ремезов А.В., Ермак В.В. «Подземную газификацию углей» как альтернатива существующим технологиям добычи угля // Геотехнология, 2006. - №7. – с.110-113.
12. Крейнин Е.Г. Подземная газификация углей как один из вариантов экологически чистого энергетического предприятия // Теплоэнергетика.- 1991. - N4. - С.17-37.
13. Бурункова Ю.Э., Успенская М.В., Самуйлова Е.О. Растительные масла: свойства, технология получения и хранения, окислительная стабильность. - СПб.: Университет ИТМО, 2020. – 82 с.
14. Аннаев Н.А., Нурмухамедов Х.С., Султонов Ж.В. и др. Гранулирование – дизайн твердых частиц. - Ташкент, ТХТИ, 2023. – 210 с.

УДК 66.099.2.

Ташбаев Т.Э., Шералиева О.А., Нигмаджанов С.К., Нурмухамедов С.Х., Усманов Б.С.

Повышение качества и гранулирование фосфогипса в турбулизированном слое

Ташбаев Тохир Эшкүзиевич-аспирант, newlandtravel@mail.ru

Шералиева Озода Анваровна- к.т.н., доцент, Ташкентский химико-технологический институт, Нигмаджанов Самуг Каримжанович. к.т.н., доцент, Ташкентский химико-технологический институт, Узбекистан, Ташкент, ул.Мирзо Улугбек, дом 41.

Усманов Ботир Сотиболдиевич – к.т.н. доц. ФерПИ. Узбекистан, г Фергана, ул.Фергана-86.

Нурмухамедов С.Х. к.т.н., ведущий специалист, АО «Махам - Чирчик», Узбекистан г.Чирчик.

В тезисе рассмотрены химическая промышленность как одна из ведущих отраслей в Центрально-Азиатском регионе, специализирующаяся на производстве минеральных удобрений, химических волокон, лакокрасочных материалов и других продуктов. Особое внимание уделяется проблеме утилизации фосфогипса, образующегося при производстве аммофоса, и возможностям его переработки. Анализируются методы гранулирования различных химических веществ, включая хлорид калия, мочевины и триполифосфат натрия, с целью улучшения их физико-химических свойств, снижения пылеобразования и повышения удобства транспортировки. Рассматриваются традиционные методы гранулирования, такие как окатывание, распыление и прессование, а также перспективные технологии, включая скоростное гранулирование в турболопастных грануляторах. Приводятся результаты исследований по повышению прочности и сферичности гранул, а также их устойчивости к механическим нагрузкам. Отмечается, что внедрение эффективных методов гранулирования способствует ресурсосбережению, минимизации отходов и улучшению экологической обстановки. В статье также анализируются работы ведущих ученых и исследователей, занимающихся совершенствованием процессов грануляции и разработкой новых установок для переработки химических отходов. В статье описана лабораторная установка для гранулирования фосфогипса, представляющая собой цилиндрический горизонтальный аппарат с механизмами загрузки и подачи связующей суспензии. Эксперименты показали, что при различных содержаниях грануляция кальцинированной соды приводит к получению шарообразных гранул. При содержании соды 3% доля товарной группы 1,0-5,5 мм образовалась 64,62%, а при 10% — увеличивалась до 75,24%, что свидетельствует о качественном улучшении гранулометрического состава. За исключением применения традиционной практики гранулирования за счет использования крупнозернистых частиц и мелкодисперсных методов, соблюдая их сцепление и образование гранул. Ключевые слова: Химическая промышленность, фосфогипс, гранулирование, хлорид калия турболопастные грануляторы, экологическая безопасность.

Improving the quality and granulation of phosphogypsum in a turbulent layer

Tashbaev T.E.¹, Sheralieva O.A.¹, Nigmatdzhonov S.K.¹, Nurmukhamedov S.Kh.² Usmanov B.S.³

¹ Tashkent Institute of Chemical Technology, Uzbekistan, Tashkent

²JSC "Maham - Chirchik", Uzbekistan, Chirchik.

³FerPI. Uzbekistan, Fergana, Fergana street-86.

The these discusses the chemical industry as one of the leading industries in the Central Asian region, specializing in the production of mineral fertilizers, chemical fibers, paints and varnishes and other products. Particular attention is paid to the problem of utilization of phosphogypsum formed during the production of ammophos, and the possibilities of its processing. The methods of granulation of various chemicals, including potassium chloride, urea and sodium tripolyphosphate, are analyzed in order to improve their physicochemical properties, reduce dust formation and increase the ease of transportation. Traditional granulation methods, such as rolling, spraying and pressing, as well as promising technologies, including high-speed granulation in turbo-blade granulators are considered. The results of studies on increasing the strength and sphericity of granules, as well as their resistance to mechanical stress are presented. It is noted that the introduction of effective granulation methods contributes to resource conservation, waste minimization and improvement of the environmental situation. The article also analyzes the work of leading scientists and researchers involved in improving granulation processes and developing new installations for processing chemical waste. The article describes a laboratory installation for granulating phosphogypsum, which is a cylindrical horizontal apparatus with mechanisms for loading and feeding a binder suspension. Experiments have shown that at different contents, granulation of soda ash leads to the production of spherical granules. With a soda content of 3%, the share of the commodity group 1.0-5.5 mm was formed 64.62%, and at 10% it increased to 75.24%, which indicates a qualitative improvement in the granulometric

composition. With the exception of the use of traditional granulation practice through the use of coarse-grained particles and fine-dispersed methods, observing their adhesion and granule formation.

Keywords: Chemical industry, phosphogypsum, granulation, potassium chloride turbolopatnye granulators, environmental safety.

Введение

Химическая промышленность нашей страны является флагманом в Центрально-азиатском регионе, а среди стран СНГ занимает одно из лидирующих мест и выпускает азотные, фосфорные, калийные, комплексные и другие минеральные удобрения, а также кальцинированную соду. Значительное развитие получило производство химических средств защиты растений, химических волокон и нитей, синтетических моющих средств, лакокрасочных материалов, спирта, резинотехнических изделий. Комплексное развитие предприятий химической промышленности путем широкого внедрения энерго- и ресурсосберегающих технологий отнесено к приоритетным общегосударственным задачам современного этапа развития экономики [1].

В настоящее время АО «Аммофос-Махам» в технологии получения аммофоса используются фосфориты Кизилкума и Каратау. Естественно, с получением товарного, гранулированного аммофоса образуется и твердый отход. Промышленная его переработка не разработана, вследствие чего фосфогипс складывается и он слеживается, превращаясь в окомкованный отвал. Причем, в период хранения отвалы занимают огромные посевные площади и ухудшают экологическую обстановку.

При производстве экстракционной фосфорной кислоты на 1 тонны P_2O_5 получают 4,5 т фосфогипса. По сравнению с масштабами выработки потребление его невелико из-за присутствия в нем нежелательных примесей. Во всех высокоразвитых странах разрабатываются процессы для решения проблемы утилизации фосфогипса. Естественно, эти отходы требуют обеззараживания или в крайнем случае нейтрализации вредных веществ и последующую грануляцию для придания товарного вида готового продукта. В общем случае гранулирование позволяет существенно уменьшить склонность продукта к слеживанию, а следовательно, упростить хранение, транспортирование и дозирование; повысить сыпучесть при одновременном устранении пылимости и тем самым улучшить условия труда в сферах производства, обращения и использования.

Так, в работах Паскина А.В. и Панасюк Е.Б. [2] превращать пылевидную фракцию хлорида калия, образующуюся на стадии сушки галургического или флотационного хлорида калия, в отделение регулируемой вакуум-кристаллизации в виде раствора с заданной концентрацией KCl в гранулы, что позволит снизить расход воды на стадию кристаллизации, уменьшить потери хлорида калия с маточными растворами и решить проблему получения обеспыленного целевого продукта.

В работе Черепановой М.В. и Лановецкого С.В. представлены исследования процесса гранулирования пылевидной фракции KCl с использованием в качестве связующего реагента 20%-ного раствора лигносульфоната технического, добавляемого в количестве 12%-ной добавки к общей массе гранулируемой смеси а также выполнена оценка влияния расхода связующего реагента, длительности окатывания, температуры процессов гранулирования и сушки на статическую прочность и фракционный состав гранулированного продукта [3, 4]. При этом средняя статическая прочность продукта оказалась на 63% выше аналогичного показателя гранул хлорида калия, полученных с 12% добавкой воды.

Общеизвестно, в процессе производства KCl образуется большое количество циклонной пыли калия хлорида [5]. Если учесть, что ежегодно выпускается несколько миллионов тонн KCl, то количество улавливаемой циклонной пыли, содержащие примеси флотореагентов будет довольно-таки значительно. Особенно это важно с точки зрения содержания полезного компонента хлорида калия в мелкодисперсном флотационном хлориде калия составляет около 90%, а количество аминов – 0,13% (130 г/т). Мелкодисперсный хлорид калия на 83% состоит из фракции менее 0,125 мм.

Известно изобретение по получению гранул мочевины со сферичностью больше 75% и остаточной влажностью равной или меньше 0,5%, в аппарате со струйным слоем [6]. В поток твердых частиц мочевины аппарата со струйным слоем вводят содержащую мочевины жидкость и поток твердых частиц мочевины поддерживают подаваемым снизу газовым потоком.

Известен способ, для получения гранулята из мочевины, однако непригодны для получения гранулята, который отвечает высоким требованиям автомобильной промышленности, в частности, таким, как очень узкий диапазон зернистости, высокая сферичность, гладкость поверхности и очень малая остаточная влажность [7].

Все известные способы получения гранулята мочевины имеют общий недостаток [8], заключающийся в том, что полученный массовый продукт, гранулят мочевины, недостаточно соответствует или совсем не соответствует требованиям при удалении азота из выхлопных газов дизельных двигателей. Гранулят недостаточно круглый, имеет широкий диапазон зернистости и негладкую поверхность.

Известен способ и установка для внесения жидкостей в поток твердого вещества аппарата со струйным слоем [9].

Исследователи David F. Pobst и Bobby J. Rowlett при гранулировании сажи, в качестве увлажняющей жидкости использовали воду или водные растворы, или эмульсии связующих или склеивающих агентов, например – сахара, смоляного или белкового клея. Готовые гранулы перед отправкой или хранением обычно подвергаются сушке [10].

В работе Куц П.С. и др. получены гранулы триполифосфата натрия методом мягкого гранулирования, Holm P. и Schaefer T. определили соотношения между пластической прочностью гранул и действующими на них динамическими нагрузок, а также получены гранулы триполифосфата натрия методом мягкого гранулирования [11], «J.M. Huber corporation» изучила получение в турболопастных грануляторах каолиновые гранулы [11, 12], Adichi R. и Hayashi T. разработали устройство и аппараты различных конструкций для гранулирования сыпучих материалов [12].

Зачастую, известные методы грануляции не позволяют получить продукт требуемого гранулометрического состава, по тем или иным причинам. Наряду с традиционными способами – окатыванием, распылением и прессованием часто начали применять один из самых перспективных и эффективных способов – скоростное гранулирование в турболопастных грануляторах [11].

Экспериментальная часть

Лабораторная установка для экспериментальных исследований по грануляции фосфогипса представляет собой цилиндрическим аппарат горизонтального типа со штуцерами загрузки, выгрузки и подачи связующей суспензии [13]. В тех случаях, когда готовый продукт после грануляции должен иметь малые диаметры ($\leq 1,0$ мм), то часть мелкодисперсной фракции остается непрореагировавшей в процессе грануляции и для её отделения от товарной фракции необходимо классифицировать. Для этого, напротив штуцера для выгрузки в верхней части корпуса предусмотрен штуцер для отвода мелкодисперсной фракции. По оси корпуса установлен вал со штырями, причем в зонах измельчения, грануляции и уплотнения они вмонтированы с различным шагом. Характерная особенность конструкции данного вала в том, что оба конца вала установлены на подшипники, а подшипник в стакан, который вращается во втулке на скользящей посадке. Вращение вала осуществляется двигателем мощностью 3,7 кВт постоянного тока. Число оборотов вала регулируется частотным преобразователем. Максимальный размер исходного материала ≤ 25 мм.

Зона измельчения	$t_{из}/d$	0,9-1,5
Зона грануляции	$t_{г}/d$	1,1-1,8
Зона уплотнения	$t_{у}/d$	2,5-4,0

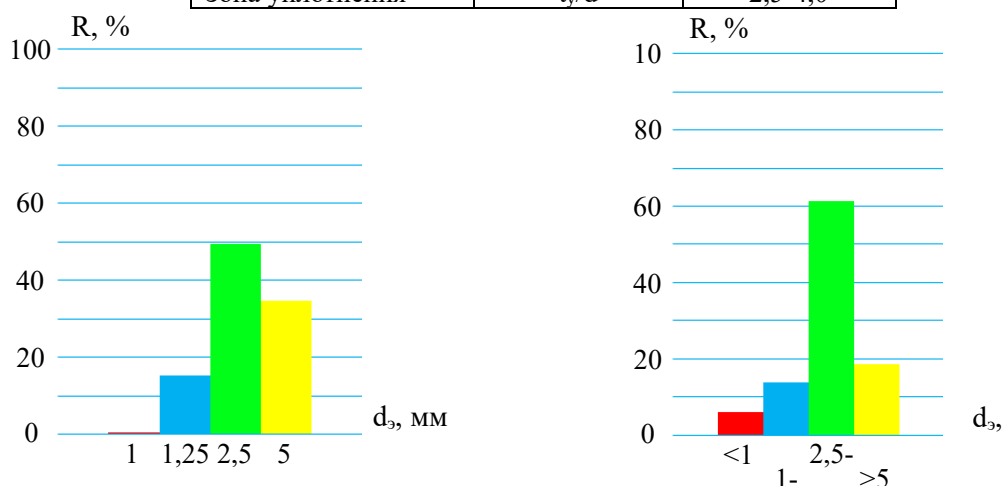


Рисунок 1 - Влияние числа оборотов рабочего вала на изменение гранулометрического состава фосфогипса грануляторе с турбулизированным слоем

Следует подчеркнуть, в зоне измельчения штыри имеют остроконечную форму, а в последующих зонах гранулирования и уплотнения - круглого поперечного сечения.

Число оборотов полого вала со штырями может изменяться в пределах 100-2400 об/мин.

Исходная влажность фосфогипса из отвала АО «Аммофос-Махам» находится в пределах 10-15%.

Гранулирование фосфогипса осуществлено в турболопастном аппарате с распылением связующей суспензии в зону гранулирования. В состав водной суспензии входят карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) до 2%, бентонит до 5% и кальцинированная сода. Серия опытов проведены при следующих содержаниях кальцинированной соды: 3, 10, 20 и 25%.

В данной серии опытов исходная влажность фосфогипса $W=10,45\%$. На распыление подается суспензии вяжущего вещества с расходом $G_{\text{сусп}}=0,085 \cdot G_{\text{ф}}$ и число оборотов рабочего вала $n=1400$ об/мин.

Шаг размещения штырей в зоне измельчения $t_{\text{и}}/d=1,25$ и в зоне грануляции $t_{\text{г}}/d=1,8$ и в зоне уплотнения $t_{\text{у}}/d=4,0$.

В экспериментах по гранулированию фосфогипса в турболопастном грануляторе при $n=1400$ об/мин., составе водной суспензии КМЦ 1,8%, бентонита 5% и кальцинированной соды 3% получены следующие результаты: доля фракции $\leq 1,0$ мм составила 0,54%, доля фракции 1,0-1,25 мм равна 13,89%, фракция в интервале 2,5-5,0 мм составила 49,34%, и наконец, частицы >5 мм – 34,84% (рис.1а). Как видно, доля товарной фракции 1,0-5,5 мм равна 64,62%. Необходимо подчеркнуть, что в процессе гранулирования получены гранулы шарообразной формы.

В следующем эксперименте при тех же режимных параметрах и при том же составе связующей суспензии, только при процентном содержании кальцинированной соды 10% произошли некоторые качественные изменения: доля фракции $\leq 1,0$ мм составила 5,97%, доля фракции 1,0-1,25 мм равна 15,28%, фракция в интервале 2,5-5,0 мм составила 61,35%, и наконец, частицы >5 мм – 18,69% (рис.1б). Из анализа рис.1б видно, что фракции от 1,0 до 5,0 мм возросли до 75,24%, т.е. по сравнению с предыдущим экспериментом качественное улучшение гранулометрического состава составило 16,5%.

Заключение

В заключении следует отметить, что достаточно высокую эффективность гранулирования в турболопастном грануляторе. Способ гранулирования в подобных аппаратах предусматривает создание турбулизированного трехфазного слоя, в которой относительно крупные частицы служат в качестве затравочных частиц в процессе образования гранул. Пространство между налипшими частицами различных форм и размеров заполняются мелкодисперсным бентонитом и частицами кальцинированной соды. В точках и небольших шероховатых поверхностях контакта соседних частиц происходит сцепление и диффузия молекул участвующих в процессе гранулообразования компонентов. Все эти вышеперечисленные факторы способствуют улучшению процесса и повышению выхода товарной фракции фосфогипса.

Список литературы

1. Ҳаракатлар стратегияси асосида жадал тараққий ва янгилашиш сари – Тошкент: Ғ.Ғулом номидаги нашриёт-матбаа ижодий уйи, 2017. - 92 б.
2. Паскина А.В., Панасюк Е.Б. Получение обеспыленного хлористого калия при галургической переработке калийных руд // Горный журнал, 2021.- № 4.- С. 73-76.
3. Черепанова М.В., Лановецкий С.В. Оценка параметров гранулирования пылевидной фракции хлорида калия в присутствии добавки лигносульфоната // Изв.ВУЗов «Химия и химическая технология», 2022.- т.65.-вып. №6.-с.88-96.
4. Черепанова М.В. Окатывание циклонной пыли хлорида калия с использованием связующих различного типа // Фундаментал. исслед., 2017. -№ 5. -С. 93-97.
5. Гранулирование циклонной пыли хлорида калия методом окатывания/ О.А.Федотова и др. // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2011. - №3. – с.63-70.
6. Патент РФ №2432200 МКП⁸ B01J 2/16. Способ получения гранул мочевины / Р.Карлхайнц, Бернхард В., Михаэль Я., Райнхард Б., Райнхард Н. – Опубл.27.10.2011, Бюлл.№30. – ил.1.- с.14.
7. EP №1136465. МКП⁸ C05G 3/00, B01J 2/16. Method for granulation of fertilizer / Kido Kimikazu, Yanagisawa Yuzuru, Fujii Hitetsugu / publ.04.09.1997.-fig.1-p.4.
8. DE №10322062. МКП⁸ B01J 8/18. Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen / Jacob Michael, Rumpier Karlheinz, Waskow Mike / publ.02.12.2004.-fig.4-p.11.
9. Патент РФ №2432200. МКП⁸ B01J 2/16. Способ получения гранул мочевины / Рюмплер Карлхайнц, Ванд Бернхард, Якоб Михаэль, Бебер Райнхард, Новак Райнхард. – опубл. 27.10.2011. – ил.1. – с.14.

10. Patent USA №3406426, МКИ⁸ B01J 2/10. Apparatus for forming aggregates of powdered materials. David F.Pobst, Bobby J.Rowlett, 1968. – 10p. – 4 fig.
11. Классен П.В., Гришаев И.Г., Шомин И.П. Гранулирование - М.: Химия, 1991. - 240 с.
12. Patent USA №4222727. МКИ⁵ B29C 7/10. Apparatus for producing granules from fine powder. Adichi R., Hayashi T. - fig.3.- 10 p.
13. Аннаев Н.А., Ташбаев Т.Э. и др. Гранулирование – дизайн твердых частиц. – Т.: ТХТИ, 2023. – 210 с.

УДК 534-8

Тихомиров В.А., Ермолов А.В., Бахаева Д.Д., Капранова А.Б.

Совершенствование процесса диспергирования твердого осадка в бисерной мельнице погружного типа с элементами прототипирования конструкции

Тихомиров Вячеслав Александрович – аспирант;

Ермолов Алесей Вениаминович – старший преподаватель кафедры; alex020573@yandex.ru ;

Бахаева Дарья Дмитриевна – старший преподаватель кафедры;

Капранова Анна Борисовна – д.ф.-м.н., проф., заведующий кафедрой;

ФГБОУ ВПО Ярославский государственный технический университет,
Россия, Ярославль 150000, Московский проспект, 88.

В тезисах рассмотрены конструктивные особенности различных схем бисерных мельниц погружного типа и способов организации процесса диспергирования в них. Сформулированы достоинства и недостатки указанных аппаратов, а также влияние их конструктивных элементов на эффективность технологического процесса. Предложены направления модернизации конструкций диспергаторов с элементами прототипирования для проектирования соответствующего оборудования.

Ключевые слова: диспергирование, процесс, мельница, мелющие тела, конструкция, прототипирование.

Improving the process of solid sediment dispersion in a submersible bead mill with design prototyping elements

Tikhomirov V.A., Ermolov A.V., Kapranova A.B.

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

The theses consider the design features of various schemes of submersible bead mills and methods for organizing the dispersion process in them. The advantages and disadvantages of the specified devices are formulated, as well as the influence of their design elements on the efficiency of the technological process. Directions for modernizing the designs of dispersers with prototyping elements for designing the corresponding equipment are proposed.

Key words: dispersion, process, mill, grinding bodies, prototyping.

Введение

Процесс диспергирования твердых веществ в жидкости, как совмещение измельчения твердых фракций и смешения измельченных компонентов [1], является актуальным этапом производственного процесса широкого спектра для отраслей химических и пищевых технологий, в фармакологии, при получении лакокрасочной продукции и др. Наиболее распространенными аппаратами для диспергирования являются бисерные мельницы. Мелющими телами бисерных мельниц являются сферы из различного рода материалов: стекла, керамики, циркония и пр. Известно множество разнообразных схем данных аппаратов, отличающихся друг от друга по различным конструктивным признакам [1, 2].

Цель настоящей работы – модернизация конструкций диспергаторов с элементами прототипирования для проектирования соответствующего оборудования на основе анализа конструктивных особенностей различных схем бисерных мельниц погружного типа. Решаемые задачи: 1) анализ конструктивных особенностей различных схем бисерных мельниц погружного типа и способов организации процесса диспергирования в них; 2) рекомендации по модернизации диспергирующего оборудования погружного типа с элементами прототипирования.

Особенности конструкций бисерных мельниц погружного типа

В последнее время широкое распространение получили мельницы погружного типа. В отличие от стационарных мельниц, в устройствах данного типа емкость, в которой происходит диспергирование, не заполняется бисером, для этого служит размещенная в данной емкости размольная корзина. Такое конструктивное решение значительно упрощает и удешевляет аппарат. При этом бисер, заполняющий размольную корзину, механическим способом приводится в движение за счет инерционных эффектов, обеспечивает измельчение твердой фазы компонентов смеси и способствует их смешению. Циркуляция смеси в процессе диспергирования происходит с помощью конструктивных элементов рабочей корзины, что позволяет исключить из схемы аппарата систему трубопроводов и насос с достаточно сложным приводом.

Организация процесса диспергирования определяется конструктивными особенностями аппарата и режимом работы. Эффективность данной технологической операции в бисерных мельницах погружного типа зависит от частоты вращения ротора/корпуса, равномерности распределения бисера по объему размольной камеры и интенсивности циркуляции смеси сквозь размольную камеру, что отражается на степени перетира твердой фазы суспензии. Конструктивно рабочие корзины можно разделить на два вида:

1) с вращающимся ротором [3, 4];

2) с вращающимся корпусом [5].

Процесс диспергирования в корзине с вращающимся ротором [3, 4] организован следующим образом: в рабочую емкость 5 аппарата помещается рабочая корзина мельницы (рис. 1).

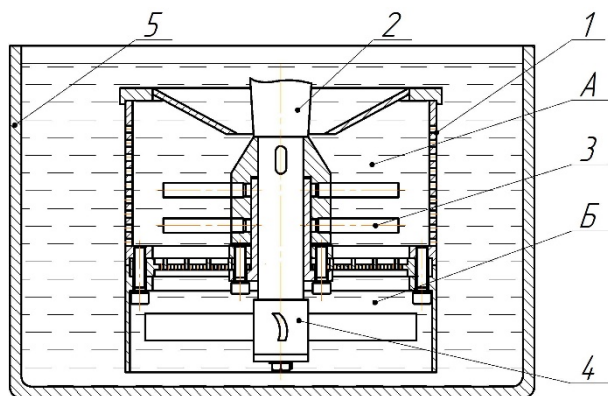


Рисунок 1 - Схема рабочей корзины с вращающимся ротором

Корпус корзины 1, включает в себя два отсека – А и Б. Отсек А заполняется бисером. Пальцевый ротор 3, закрепленный на вращающемся валу 2, придает импульс движения бисеру. При столкновении бисера с компонентами твердой фазы суспензии происходит их измельчение, а также смешение между собой и жидкой фазой смеси. Полученная смесь просачивается через сквозные отверстия в боковых стенках и днище отсека А корзины 1, попадает в рабочую емкость устройства и в отсек Б, в котором вращается лопастной вентилятор 4. Лопастный вентилятор создает циркуляцию суспензии сквозь размольную камеру.

В аппарате с вращающимся корпусом [5] технологический процесс протекает таким образом: размольная корзина, заполненная бисером, закреплена на вращающемся полой валу 13 (рис. 2). Сквозь него проходит неподвижный вал 14 с закрепленным на конце диском 15. На боковых поверхностях диска размещены кулачки 16. Внутри корзины на верхней и нижней ее крышках также имеются кулачки 17. Вращающаяся корзина создает гидродинамические потоки смеси в деже, а движущиеся с корзиной кулачки 17 и неподвижные кулачки диска 16 придают бисеру импульс движения в разных направлениях, интенсифицируя процесс диспергирования.

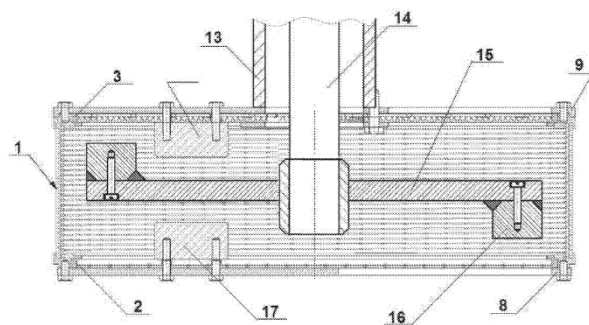


Рисунок 2 - Схема рабочей корзины с вращающимся корпусом

Аппараты с вращающейся корзиной конструктивно проще, и, следовательно, дешевле в производстве, но, вследствие относительно невысокой энергии движения бисера, имеют ограничения

по гранулометрическому составу смеси. Более перспективными с точки зрения совершенствования организации процесса диспергирования являются конструкции с вращающимся ротором.

Направления модернизации конструкций погружного типа

При проектировании погружных бисерных мельниц необходимо решить две основные задачи:

- 1) обеспечить равномерное распределение рабочих тел по объему размольной камеры;
- 2) создать циркуляцию смеси в рабочей емкости.

Первую задачу решают путем совершенствования конструкции ротора и формы размольной камеры.

Сотрудниками кафедры «Теоретическая и прикладная механика» ЯГТУ предложена конструкция модернизированной рабочей корзины бисерной мельницы погружного типа (рис. 3).

В данной схеме вместо пальцевого ротора (рис. 1) в качестве разгонных элементов, придающих импульс движения бисеру, использованы четырехлопастные крыльчатки. Верхняя и нижняя крыльчатка имеет трапецевидное поперечное сечение лопастей (рис. 4, а). Заметим, что лопасти нижнего ряда сориентированы скосом вверх, верхнего – фаской вниз. Средняя крыльчатка имеет прямоугольное сечение лопасти (рис. 4, б) и установлена на валу с угловым смещением относительно верхнего и нижнего ряда на 45° . Для уменьшения сопротивления циркуляции суспензии, в лопастях предусмотрены окна прямоугольной формы.

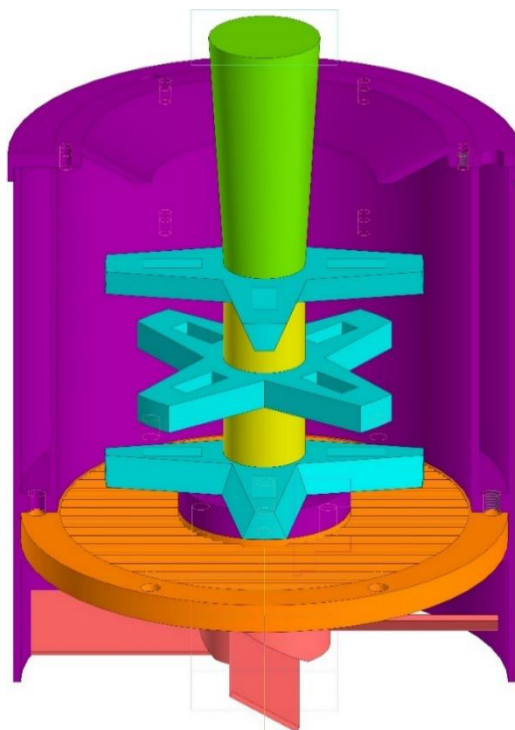


Рисунок 3 - 3-D модель модернизированной рабочей корзины

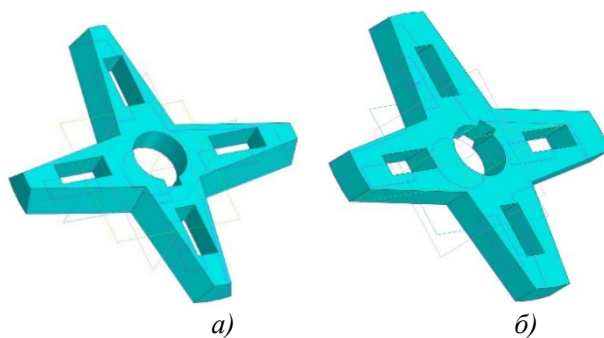


Рисунок 4 - Разгонный элемент: а) крыльчатка трапецевидная, б) крыльчатка прямоугольная

Представленная конструкция ротора позволяет придать мелющим телам более высокую энергию движения, а также способствует равномерному их распределению в пространстве размольной камеры. Данный эффект достигается за счет того, что трапецевидная форма лопастей сообщает бисеру не только горизонтальный, но и вертикальный импульс движения. Кроме того, крыльчатки имеют более высокую поверхность соприкосновения с мелющими телами по сравнению с пальцами.

Вышеперечисленные факторы позволяют улучшить гранулометрические характеристики получаемого продукта, а также повысить эффективность и сократить длительность технологического процесса.

Элементы прототипирования конструкции

При системном подходе [6, 7] к проектированию требуется выявить наиболее значимые конструктивные и режимные параметры аппарата, чтобы определить оптимальное сочетание основных и конструктивных размеров и провести необходимые проектные и проверочные расчеты. Задача упрощается при использовании системы автоматизированного проектирования (САПР) [8, 9]. При разработке вышеописанного аппарата выполнено прототипирование на основе параметрического 3D моделирования. Полученная 3D модель позволяет определить точки приложения и направления векторов нагрузок, выполнить уточненные прочностные расчеты, выявить наиболее нагруженные элементы конструкции, а также использовать полученные параметрические уравнения при проектировании других типоразмеров подобных аппаратов.

Основные входные и выходные параметры модели, а также параметрические уравнения их взаимосвязи приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Значения глобальных переменных и параметрические уравнения

Глобальные переменные, размерность	Обозначение / Уравнение	Значение
Мощность двигателя, кВт	P_d	2.2
Частота вращения двигателя, мин ⁻¹	n_d	1410
Объем размольной камеры, 10 ³ мм ³	V	2027.106
Внутренний диаметр рабочей корзины, мм	$D_1 = (1.0346V)^{1/3}$	128
Высота рабочей корзины, мм	$H = V/D_1$	142
Наружный диаметр рабочей корзины, мм	$D = 1.21D_1$	172
Наружный диаметр приемной воронки, мм	$D_в = D_1 - 17$	125
Угол конусности приемной воронки, град	$\varphi_в$	123
Диаметр отверстия приемной воронки, мм	$D_{ов} = D_1/3$	47.3
Диаметр приводного вала, мм	$d = 10 \left(\frac{30000P_d}{\pi n_d} \right)^{1/3}$	25
Наружный диаметр лопастей крыльчатки, мм	$D_k = 0.92D_1$	130
Длина лопасти, мм	$L_l = D_k/2 - d$	50
Угол профиля лопасти, град	α	20
Ширина лопасти у основания, мм	$B_o = 2.5\pi d/4$	39
Ширина лопасти на конце, мм	$B_k = B_o - 2L_l \tan \alpha/2$	21
Угол основания трапеции сечения лопасти, град	φ_l	60
Толщина лопасти, мм	$\delta_l \geq 6$	10
Наружный диаметр лопастного вентилятора, мм	$D_{вент} = D - 2S - 10$	157
Число лопастей	z	4
Угол поворота лопасти, град	γ	43
Толщина стенки корпуса	$S \geq 2$	2.5

Исходными данными для проектирования, и, соответственно, входными параметрами модели являются мощность и частота вращения двигателя (P_d и n_d), а также рабочий объем размольной камеры V . Исходя из этого определяются основные конструктивные размеры рабочей корзины: внутренний и наружный диаметр размольной камеры (D_1 и D), ее высота H , а также размеры приемной воронки $D_в$, $\varphi_в$ и $D_{ов}$. Основными исполнительными элементами мельницы являются четырехлопастные крыльчатки, закрепленные на приводном валу. Основные размеры этих деталей (диаметр вала d , наружный диаметр крыльчатки D_k , длина лопасти L_l , ширина лопасти в разных сечениях B_o и B_k , и др.) связаны с входными параметрами модели и размерами рабочей корзины параметрическими зависимостями. Производительность аппарата и качество смеси определяются

особенностями конструкции лопастного вентилятора, создающего циркуляцию суспензии сквозь размольную камеру. Размеры вентилятора (наружный диаметр $D_{\text{вент}}$, число лопастей z и угол поворота лопасти γ) относятся к выходным параметрам модели.

На базе сформированной системы параметрических уравнений произведен расчет конструктивных параметров аппарата, построена 3D модель рабочей корзины (рис. 3), и изготовлена лабораторная установка.

Заключение

Задачи повышения эффективности технологического процесса можно решить путем модернизации конструктивных параметров аппарата, например, в отношении конструкции ротора, а также при введении дополнительных конструктивных элементов в схему размольной камеры, повышении производительности устройств для реализации циркуляции суспензии, и т.п. Применение системного подхода к проектированию с элементами прототипирования способствует созданию условий повышения как энерго- и ресурсоэффективности, так и интенсификации производства при эксплуатации диспергирующего оборудования.

Таким образом, исследование процессов, протекающих в рабочей корзине, и применение современных методов проектирования позволяет определить пути совершенствования существующих конструкций и создания новых моделей аппаратов данного типа.

Список литературы

1. Севостьянов, В.С. Энергосберегающие помольные агрегаты: монография [Текст] / В.С. Севастьянов. – Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2006. 435 с.
2. Ермолов, А.В. Анализ разновидностей современного диспергирующего оборудования / А.В. Ермолов, С.Л. Мазуровский, А.Б. Капранова // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 6. С. 116-124.
3. Пат 5184783 США, МПК B02C17/00. Basket media mill and method [Текст] / Н Herman, А Paterson; заявитель и патентообладатель Hockmeyer Equipment Corp. – № 802,137 заявл. 03.12.1991; опубл. 09.02.1993.
4. Пат 7175118 В2 США, МПК B02C17/16, МПК B02C17/00. Apparatus and method for processing high viscosity dispersions [Текст] / Н Herman; заявитель и патентообладатель Hockmeyer Equipment Corp. – № 10/865,448 заявл. 10.06.2004; опубл. 13.02.2007.
5. Пат 179927 U1 Российская федерация, МПК B02C17/10. Корзина размольная для бисерной мельницы [Текст] / К.В. Сергеев, В.Ф. Сохин, Е.В. Васильев, Р.Н. Равилов; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Новый дом». – № 2018106026; заявл. 19.02.2018 опубл. 29.05.2018.
6. Мешалкин, В.П. Основы интенсификации и ресурсоэнергоэффективности химико-технологических систем. Смоленск: ООО «Принт-экспресс», 2021. 442 с.
7. Кафаров, В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Топологический принцип формализации [Текст] / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов. – М.: Наука, 1979. – 394 с.
8. Сторчак, Н.А. Моделирование трехмерных объектов в среде КОМПАС-3D учебное пособие [Текст] / Н.А. Сторчак, В.И. Гегучадзе, А.В. Синько. РПК Политехник ВолгГТУ, Волгоград, 2006. 216 с.
9. Молодова, Ю.И. Создание параметрической модели в редакторе APM Graph [Текст] / Ю.И. Молодова, В.А. Цветков. – СПб: Университет ИТМО, 2019. – 27 с.

УДК 66-5:681.12

Туркова Е.В., Кичатов К.Г., Просочкина Т.Р.

Программно-аппаратный комплекс для измерения и контроля расхода воды в термостате

Туркова Елена Вячеславовна – магистрант кафедры нефтехимии и химической технологии;

Кичатов Константин Геннадьевич – к.х.н., доцент кафедры нефтехимии и химической технологии,

Kichatov_k@mail.ru;

Просочкина Татьяна Рудольфовна – д.х.н., профессор, заведующий кафедрой нефтехимии и химической технологии

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,

Россия, Уфа, 450064, Космонавтов, дом 1.

Рассмотрен вариант дооснащения термостата программно-аппаратным комплексом на базе платы разработки Arduino Uno. Разработанная конструкция и программное обеспечение позволяют в режиме онлайн отслеживать и контролировать расход воды, подаваемой насосом лабораторного термостата внешним потребителям. В состав комплекса входит турбинный датчик расхода, основанный на эффекте Холла, и вычислительный узел на базе платы Arduino Uno. Разработка прошла апробацию в лабораторных условиях и позволила обеспечить стабильность выполнения научных исследований и лабораторных работ студентами.

Ключевые слова: расходомер, датчик Холла, Arduino, объемный расход, термостат.

Hardware and software complex for measuring and controlling water flow in a thermostat

Turkova E.V., Kichatov K.G., Prosochkina T.R.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ufa State Petroleum Technological University",

Russia, Ufa, 450064, Kosmonavtov, Building 1.

An option has been considered for retrofitting a thermostat with a hardware and software complex based on the Arduino Uno board. The developed design and software allow online monitoring and control of the water flow supplied by the laboratory thermostat pump to external consumers. The complex includes a turbine flow sensor based on the Hall effect and a computing unit based on the Arduino Uno board. The development was tested in laboratory conditions and ensured the stability of scientific research and laboratory work by students

Keywords: flow meter, Hall sensor, Arduino, volume flow metering, thermostat

Введение

Расходомеры играют важную роль в различных промышленных процессах, обеспечивая стабильность, эффективность и надежность функционирования производственных и технологических объектов. При использовании датчиков их основной функционал заключается в дозировании и измерении расхода жидкостей и газов для контроля и оптимизации систем.

Одним из крупнейших потребителей различных типов расходомеров являются нефтегазовая, химическая и нефтегазохимическая промышленность, которые используют их не только для контроля технологических потоков в хозяйственных операциях, но и для обеспечения безопасности процессов и соблюдения норм технологического режима. В промышленности применяются различные виды расходомеров – турбинный, магнитный, вихревой, ультразвуковой, кориолисовый и др.

Традиционные промышленные датчики, применяющиеся на производственных объектах, имеют сложные настройки и высокие цены на рынке, что ограничивает их доступность. Применение подобных устройств в лабораторной практике зачастую избыточно и не является целесообразным.

В случае отсутствия жестких требований к точности и надежности применяемых средств контроля и автоматики, а также с целью ознакомления студентов с принципами функционирования систем сбора и обработки информации, возможно создание и программирование устройств контроля расхода на базе платформы Arduino Uno – доступной платформы для создания прототипов [1].

Во-первых, с помощью данного программно-аппаратного комплекса можно быстро собрать и настроить систему любой сложности вплоть до автономных роботизированных систем с элементами искусственного интеллекта, но при этом элементы конструкции являются недорогими, модульными, взаимозаменяемыми и дополняемыми.

Во-вторых, большим преимуществом в использование Arduino Uno является то, что эта программная платформа является бесплатной и работает не только на компьютерах с операционной системой Windows, но и на компьютерах под управлением Linux и Mac OS.

В-третьих, сам язык программирования Arduino C можно назвать простым в освоении, для него доступно большое количество библиотек с программным кодом для различных задач.

В этой связи разработка программно-аппаратного комплекса на базе Arduino Uno для измерения скорости потока воды и расчета её объема с использованием турбинного датчика расхода является актуальной. При необходимости существует возможность масштабирования разработанных решений, в том числе для отлаживания управления процессами в дистанционной форме.

Создание программно-аппаратного комплекса

В состав разработанного программно-аппаратного комплекса входят:

- датчик расхода турбинный YF-S201;
- ЖК-дисплей LCD 1602A;
- система контроля контрастности дисплея на базе потенциометра;
- плата сбора и обработки информации Arduino Uno на микроконтроллере ATmega328P.

В основе работы турбинного датчика расхода лежит эффект Холла – процесс возникновения поперечной разности потенциалов при помещении проводника с постоянным током в магнитное поле [2]. Он применяется в различных областях таких как электротехника (измерение мощности), определение положения (в принтерах), определение скорости вращения и движения (антиблокировочная система, расходомерах), системах управления (джойстиках). Преимуществом использования данного эффекта в датчиках является бесконтактное измерение (что позволяет производить полностью герметичные датчики), широкий спектр применения, прочность и стойкость к агрессивным средам, компактность. Недостатком является погрешность получения данных при высоких температурах.

Расходомер состоит из корпуса, лопастей, вала с магнитом и катушки с током (рис.1). Принцип работы основан на том, что жидкость 1, попадая в корпус, давит на ребра турбины, заставляя её вращаться на оси 2. На одной из лопастей установлен постоянный магнит 4, который проходя рядом с датчиком Холла 3, формирует импульс напряжения [3].

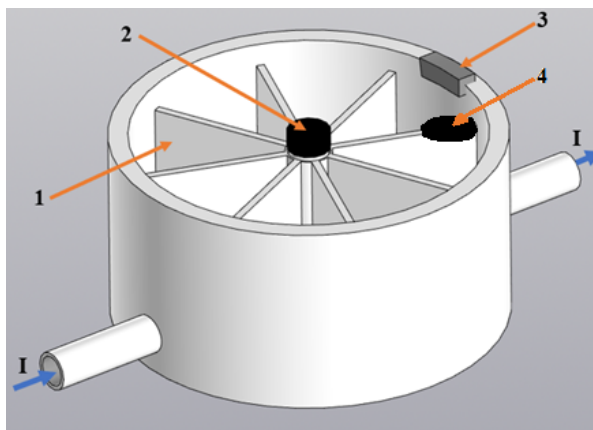


Рисунок 1 - Вид расходомера YF-S201: 1 – поток жидкости; 2 – турбинное колесо; 3 – датчик Холла, 4 – магнит.

Полученные с датчика импульсы напряжения пропорциональны объемному расходу жидкости, проходящей через турбину. Следовательно, замеряя число импульсов за определенный промежуток времени, можно вычислить значение объемного расхода жидкости.

Датчик расхода воды YF-S201 имеет определенный диапазон допустимого объемного расхода (от 300 до 6000 мл в минуту). Согласно руководству по эксплуатации, объемный расход жидкости находится по формуле:

$$Q = \frac{F}{7.5}, \quad (1)$$

где F – частота импульсов;

Q – объемный расход потока л/с.

Для измерения расхода жидкости подобными датчиками чаще всего используются 2 алгоритма. Первый алгоритм основан на подсчете количество импульсов с датчика за одну секунду. Преимуществом данного метода является точный подсчет импульсов, относительно простая реализация и непрерывная работа. Недостаток данного метода заключается в том, что при наличии турбулентности или небольших скоростях потока точность измерений ухудшается. Второй способ представляет собой измерение времени (пауз) между двумя последовательными импульсами. Преимуществом данного метода является большая точность измерения при малых и нерегулярных скоростях потока. Среди недостатков метода можно отметить относительную сложность реализации алгоритма, высокие требования к измерению времени микроконтроллером, меньшую точность при измерении больших расходов.

Поскольку к лабораторному термостату не предъявляются высокие требования к точности измерения расхода воды, при этом насос термостата чаще всего работает на номинальной подаче без резких изменений расхода, для программирования микроконтроллера выбран первый алгоритм подсчета импульсов.

Рассчитанные микроконтроллером значения расхода выводятся на экран ЖК-дисплея LCD1602A, состоящий из двух строк по 16 символов каждая. Подключение дисплея выполнено по параллельному интерфейсу (рис. 2) [4].

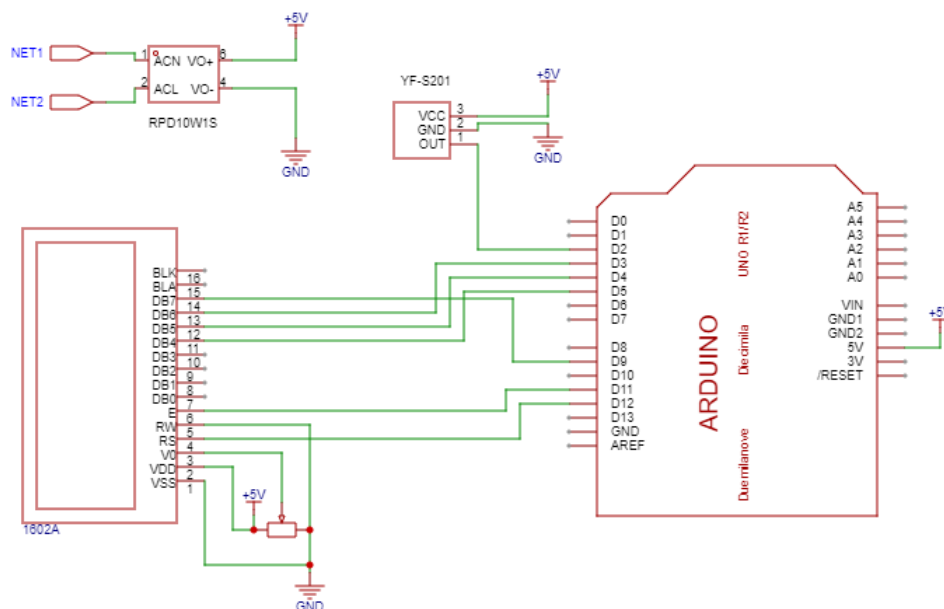


Рисунок 2 - Схема присоединения датчиков к плате.

Для быстрого прототипирования и отладки схема собрана на макетной плате. Разработанный программно-аппаратного комплекса представлен на рис. 3.

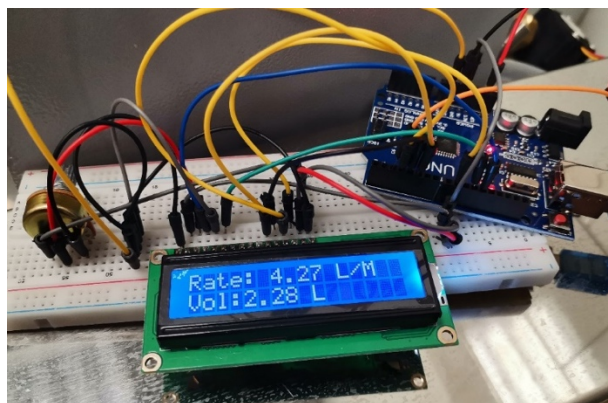


Рисунок 3 – Общий вид разработанного программно-аппаратного комплекса

Заключение

Таким образом, на базе платы Arduino Uno на микроконтроллере ATmega328P с применением турбинного датчика расхода и ЖК-дисплея разработан программно-аппаратный комплекс, позволяющий осуществлять контроль расхода воды потребителям. Дооснащение лабораторного термостата этим комплексом позволяет полностью автоматизировать его работу в режиме онлайн: не только определять расход воды из насоса термостата, но и отслеживать возможное снижение расхода или прекращение ее подачи. Герметичное исполнение датчика расхода в сочетании с высокой точностью, долговечностью, малым энергопотреблением делает возможным его применение и в случае агрессивных сред, что открывает широкие возможности для создания опытных образцов и управления различными технологическими процессами.

Список литературы

1. Эсетов, Ф. Э. Разработка интерактивных устройств на аппаратно-программной платформе Arduino : учебно-методическое пособие / Ф. Э. Эсетов, Н. А. Кулибеков. — Махачкала: ДГПУ, 2023. — 96 с.
2. «Совершенствование инженерно-технического обеспечения производственных процессов и технологических систем: материалы конференции / под редакцией Ю. А. Ушакова. — Оренбург: Оренбургский ГАУ, 2020. — 254 с.
3. Гаштова, М. Е. Технология формирования систем автоматического управления типовыми технологическими процессами, средствами измерений, несложными мехатронными устройствами и системами: учебное пособие для СПО / М. Е. Гаштова, М. А. Зулькайдарова, Е. И. Мананкина. — 5-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2025. — 212 с.
4. EasyEDA - Easy-to-use & Free PCB Design Software. //версия 2.2.37.3// <https://easyeda.com/>.

УДК 665.6

Федоров А.В., Глебов М.Б.

Каталитическое окисление нефтяных сульфидов дизельной фракции при производстве судовых топлив

Федоров Артём Вадимович – аспиранта 3-го года обучения кафедры кибернетики химико-технологических процессов; artem.fedorov7799@mail.ru.

Глебов Михаил Борисович – д.т.н., профессор;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,
Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В статье рассмотрены методы каталитического окисления нефтяных сульфидов дизельной фракции перекисью водорода. В работе изучена кинетика процесса окисления в присутствии молибденовой кислоты в качестве катализатора. Обоснованы перспективы проведения исследований в области окисления нефтяных сульфидов до сульфоксидов.

Ключевые слова: нефть, сульфиды, сульфоксиды, окисление, перекись водорода, молибденовая кислота, судовое топливо.

REVIEW OF ALTERNATIVE METHODS FOR OXIDATION OF PETROLEUM SULFIDES

Fedorov A.V.¹, Glebov M.B.¹

¹ D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The article considers methods of catalytic oxidation of oil sulfides in diesel fraction by hydrogen peroxide. The kinetics of the oxidation process in the presence of molybdenum acid as a catalyst is studied. Prospects for research in the field of oxidation of petroleum sulfides to sulfoxides are substantiated.

Keywords: oil, sulfides, sulfoxides, oxidation, hydrogen peroxide, molybdenum acid, marine fuel.

Введение

Судовые топлива являются основным энергоресурсом морского транспорта и играют ключевую роль в обеспечении глобальной логистики и международной торговли, составляя основу энергоснабжения морского транспорта. При этом актуальные экологические нормативы, введенные Международной морской организацией по содержанию серы в судовом топливе, формирует необходимость рассмотрения альтернативных методов очистки нефтяных фракций от сернистых соединений [1].

Россия занимает значимое место на мировом рынке судовых топлив, чему способствует развитая нефтеперерабатывающая инфраструктура и доступ к стратегическим сырьевым ресурсам. По данным Министерства энергетики РФ, в 2023 году объем производства судового топлива в стране составил около 8 млн тонн, при этом основная доля приходится на высокосернистые марки (с содержанием серы более 1 % масс.) [2].

Основным источником серы в дизельных фракциях являются нефтяные сульфиды, включая тиофены, бензотиофены и их алкилированные производные. Технология гидроочистки, применяемая в промышленности, требует значительных энергозатрат, использования дорогостоящих катализаторов на основе благородных металлов, а также необходимости проведения реакции под давлением до 10 Мпа. Перечисленные факторы повышают стоимость производства и снижает рентабельность [3].

Перспективным направлением является каталитическое окисление сульфидов до сульфоксидов, которые являются полярными соединениями и будут выделены из углеводородной фазы методом жидкостной экстракции. В данной статье рассматривается технология применения перекиси водорода (H_2O_2) в сочетании с молибденовой кислотой (H_2MoO_4), которая выступает в роли катализатора. Перекись водорода является экологически безопасным окислителем, разлагаясь до воды и минимизируя токсичные отходы, а молибденовая кислота демонстрирует высокую каталитическую активность в окислительных процессах благодаря переменной степени окисления молибдена и способности формировать пероксидные комплексы [4].

Целью данного исследования является обоснование целесообразности применения системы из H_2O_2 и H_2MoO_4 для окисления нефтяных сульфидов в дизельных фракциях. Научная новизна работы заключается в изучении механизмов активации H_2O_2 в присутствии молибденовых соединений и определении кинетических закономерностей процесса. Практическая значимость связана с разработкой энергоэффективного метода, который будет осуществим при невысоких температурах и атмосферном давлении.

Теоретическая часть

Каталитическое окисление сульфидов до сульфоксидов в дизельных фракциях представляет собой сложный многостадийный процесс, эффективность которого определяется как природой катализатора, так и кинетическими особенностями реакций. На сегодняшний день вопросы, связанные с механизмами и кинетическими закономерностями каталитического окисления сульфидов, остаются недостаточно изученными. Для оптимизации параметров процесса, включающих в себя подбор температуры, времени контакта и концентрацию окислителя необходимо полное понимание структуры данных механизмов.

Результаты исследования расширяют представление о механизмах окислительного обессеривания и могут быть использованы для разработки ресурсоэффективных технологий производства судовых топлив, соответствующих современным экологическим стандартам [5].

В статье рассмотрены экспериментальные методики, кинетический анализ данных и практические аспекты применения полученных результатов для реализации проекта в нефтеперерабатывающей отрасли.

Каталитическое окисление сульфидов перекисью водорода в присутствии молибденовой кислоты

В работе исследована дизельная фракция нефти Абинского месторождения. Данная фракция получена методом атмосферной перегонки, при этом температурный диапазон кипения для данных фракций составляет 180–360°C, что соответствует требованиям к судовым топливам (ISO 8217).

Групповой углеводородный состав дизельной фракции Абинского месторождения, согласно технической документации, преимущественно представлен насыщенными углеводородами с долей ароматических соединений, что характерно для нефтей Западно-Сибирского региона. Содержание сероорганических соединений в подобных фракциях традиционно высоко, что связано с геохимическими особенностями исходного сырья. Основными сернистыми компонентами в дизельной фракции являются тиофены, алифатические сульфиды и дисульфиды [6].

Концентрация нефтяных сульфидов в рассматриваемой пробе дизельной фракции Абинского месторождения, достигает 0,9% (масс.), что подтверждает актуальность проведения каталитического окисления данного образца [7].

Выбор молибденсодержащих катализаторов для окисления сульфидов обусловлен их высокой селективностью к алифатическим и нафтеновым структурам, что подтверждается исследованиями в области нефтехимии [8]. Полученные данные согласуются с типовыми характеристиками дизельных фракций региона и подчеркивают актуальность разработки методов десульфуризации для коммерциализации данного проекта.

Экспериментальное исследование кинетики каталитического окисления сульфидных соединений в дизельной фракции проводилось с использованием системы на основе пероксида водорода (H_2O_2) и молибденовой кислоты в качестве катализатора [9].

Перед началом реакции молибденовую кислоту активировали путем 30-минутной инкубации в 30%-ном водном растворе пероксида водорода. Расчетное количество катализатора (0,004 г) вносили в окислитель однократно для достижения оптимальной активности. Далее к 100 г дизельного дистиллята, предварительно нагретого до 70°C, добавляли смесь из 3 мл 30%-ного раствора H_2O_2 и активированного катализатора. Реакционную массу выдерживали при постоянном перемешивании в изотермических условиях ($70 \pm 1^\circ C$) для исключения влияния температурных колебаний.

Динамику окисления сульфидной серы контролировали через фиксированные интервалы времени: 0, 20, 40, 60, 90, 120, 150 и 180 минут. Общая продолжительность процесса составила 3 часа. По завершении каждого временного отрезка осуществлялся отбор пробы, после чего органическую фазу отделяли от водной центрифугированием при 5000 об/мин в течение 5 минут. Количественный анализ содержания сульфидной серы в исходном сырье и полученных образцах выполняли методом потенциометрического титрования с использованием сульфид-селективного электрода XC-S-001 на анализаторе Экотест-120. Для калибровки применяли стандартные растворы сульфида натрия.

Результаты и их обсуждение

Схема окисления нефтяных сульфидов пероксидом водорода в присутствии молибденовой кислоты можно представить в виде (рис. 1):

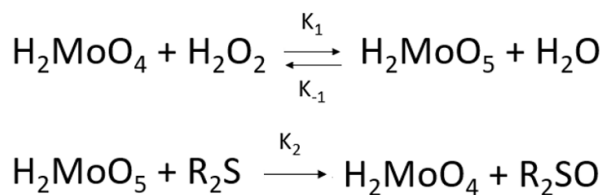


Рисунок 1 - Стадии протекания каталитического окисления нефтяных сульфидов

Пероксокомплекс молибденовой кислоты, образованный на первой стадии реакции, взаимодействует с нефтяными сульфидами с образованием интермедиата (рис. 2) с последующим превращением в целевой продукт окисления – сульфоксид [6].

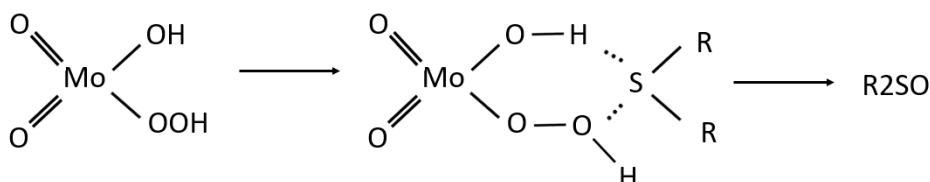


Рисунок 2 - Механизм протекания каталитического окисления нефтяных сульфидов

По результатам проведенного эксперимента, были получены экспериментальные данные окисления нефтяных сульфидов (R₂S) (Таблица 1).

Таблица 1
Окисление сульфидов пероксидом водорода в присутствии Молибденовой кислоты. Условия окисления: T=70° C, длительность окисления – 3 часа

Время, с	[R ₂ S], моль/л
0	0,0885
120	0,0770
180	0,0690
300	0,0580
600	0,0440
1800	0,0280
3600	0,0170
5400	0,0110
7200	0,0082
10800	0,00675

Согласно полученным экспериментальным данным, была построена кинетическая кривая зависимости изменения концентрации R₂S (рис. 3)

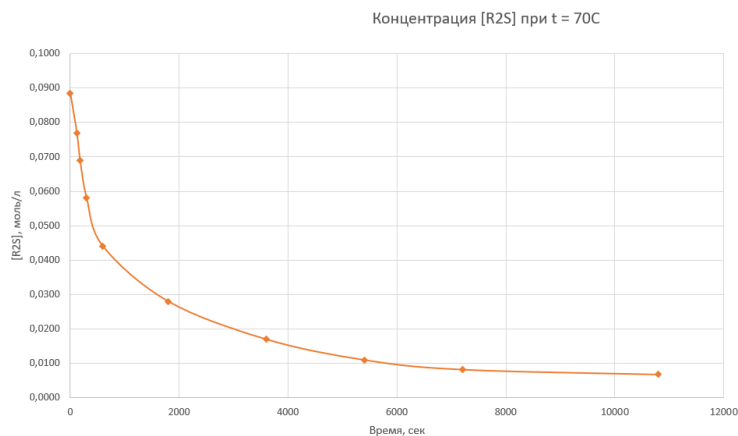


Рисунок 3 - Кинетическая кривая окисления концентрации нефтяных сульфидов перекисью водорода в присутствии молибденовой кислоты

Экспериментальные кинетические кривые, полученные при каталитическом пероксидном окислении в присутствии H_2MoO_4 и $T=70^\circ$, демонстрируют снижение концентрации нефтяных сульфидов. Константа скорости реакции была определена методом сканирования с переменным шагом и составила $k = 0,0144 \text{ с}^{-1}$. Степень конверсии реакции за 3 часа достигла 92,4%, тогда как без катализатора, согласно проведенным исследованиям, этот показатель не превышает 25%. Концентрация сульфидов была снижена до 0,069% масс., что значительно превосходит требования норм IMO 2020, регламентирующих содержания серы до 0,5% масс.

Результаты и их обсуждение

Согласно полученным расчетам, степень пероксидного окисления в присутствии молибденовой кислоты сульфидов дизельной фракции до сульфоксидов составила 92,4%, что подтверждает перспективность выбранного метода технологической очистки дизельной фракции от сульфидов. Результаты демонстрируют, что предложенная технология позволяет снизить содержание серы в дизельных фракциях до уровня, соответствующего IMO 2020.

Список литературы

1. Петрухина Н.Н., Вострикова Ю.В., Некоторые аспекты превращений высокомолекулярных соединений нефтей в процессе окислительного обессеривания. -Москва: РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, 2013. - 3 с.
2. Анализ поставок судов морского транспортного флота за 2023 год. – URL: <https://cniimf.ru/press-tsentr/news/1790/> (дата обращения 21.02.2025).
3. Байбуртли А.В. Повышение продуктивности нефтяных скважин в процессе добычи нефти. / Байбуртли А.В., Маркова Е.Л., Газизова З.Ш., Шаяхметова Г.Р., Борисов И.М. // Малоотходные, ресурсосберегающие, химические технологии и экологическая безопасность. Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием. – 2013. – С. 42-43
4. Ляпина Н.К. Химия и физикохимия сероорганических соединений нефтяных дистиллятов. // М.: Наука. - 1984. - 120 с.
5. Капустин В.М., Рудин М.Г. Химия и технология переработки нефти. –М.: Химия, 2013. – 496 с.
6. Караулова Е.Н. Методы получения сульфоксидов из средних фракций сернистых нефтей / Караулова Е.Н., Бардин Т.А., Гальперн Г.Д. // Методы анализа органических соединений нефти, их смесей и производных. - М. - 1969. - С. 95.
7. Wan Mokhtar W., Abu Bakar W., Rusmidah A. Deep desulfurization of model diesel by extraction with N,N-dimethylformamide: Optimization by Box–Behnken design // Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 2014. V. 35. P. 314 – 319.
8. Кривцова К.Б., Кривцов Е.Б., Головкин А.К. Удаление сернистых соединений из дизельной фракции комбинацией окисления и экстракции // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 3. – С. 116–120.
9. Bosmann A., Datsevich L., Jess A. Deep desulfurization of diesel fuel by extraction with ionic liquids // Chem. Commun. 2001. V. 24. № 24. P. 2494 – 2495.

УДК 667-12

Филатов М.А., Левченко Э.П., Павленко А.Т., Ткачев Р.Ю., Карпук А.В.

Обоснование работы электромагнитной мельницы для приготовления суспензий

Филатов Максим Анатольевич – старший преподаватель кафедры,
Левченко Эдуард Петрович – к.т.н, доцент кафедры; edulep@rambler.ru.
ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет»,
Россия, Алчевск, 294204, пр. Ленина, дом 16.

Павленко Александр Тимофеевич к.т.н, доцент кафедры;

Ткачев Роман Юрьевич – к.т.н, доцент кафедры;

ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет им. В. Даля»,
Россия, Луганск, 291000, кв. Молодёжный, дом 20а.

Карпук Андрей Васильевич – студент,

ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет»,
Россия, Алчевск, 294204, пр. Ленина, дом 16.

В тезисах рассмотрены основные технические аспекты проблем бисерных мельниц и пути их усовершенствования, как основных аппаратов, применяемых в химической промышленности при приготовлении красок путём перетирания пигментов до необходимой тонины в жидкой среде. Движение мелющей загрузки в рабочей камере под действием электромагнитного поля позволяет повысить эффективность приготовления продукта за счёт исключения подвижных частей аппарата.

Ключевые слова: бисерная мельница, жидкая фаза, пигмент, электромагнитное поле, перетирание.

Justification of the operation of an electromagnetic mill for the preparation of suspensions

Filatov M.A.¹, Levchenko E.P.¹, Pavlenko A.T.², Tkachev R.U.², Karpuk A.V.¹

1 Donbass State Technical University, Alchevsk, Russian Federation

2 Lugansk State University named after. V. Dahl, Lugansk, Russian Federation

The theses consider the main technical aspects of the problems of bead mills and ways of their improvement as the main devices used in the chemical industry in the preparation of paints by grinding pigments to the required fineness in a liquid medium. The movement of the grinding charge in the working chamber under the action of an electromagnetic field allows to increase the efficiency of product preparation by eliminating moving parts of the device.

Key words: bead mill, liquid phase, pigment, electromagnetic field, grinding.

Введение

При производстве лакокрасочных материалов в химической промышленности [1] широко распространена технология перетирания красящего пигмента в жидкой среде (например, олифе). Это достигается в специальных аппаратах – бисерных мельницах [2], где в качестве мелющей загрузки применяются стеклянные шарики или крупнозернистый песок (рис. 1).

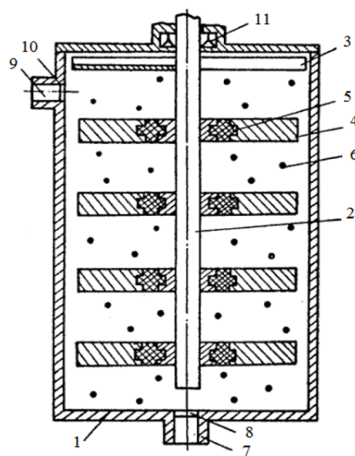


Рисунок 1 - Бисерная мельница: 1 — корпус; 2 — вертикальный вал; 3 — пропеллер; 4 — диски; 5 — упругие элементы; 6 — бисер; 7, 9 — штуцер; 8, 10 — сетка; 11 — манжета.

Принцип работы подобного аппарата заключается в медленном активном перемалывании пигмента в жидкой фазе по мере её прокачки из нижней части корпуса вверх с помощью шестерёнчатого насоса. Корпус мельницы заполнен большим количеством стеклянного бисера, движение которому передаётся посредством вращающихся дисков, насаженных на вал, снабжённый электроприводом (двигателем переменного тока).

Широкое применение таких мельниц на лакокрасочных заводах дают достаточно устойчивые результаты в производстве красок, однако характеризуются и некоторыми недостатками. К ним относятся: сравнительно быстрый износ дисков и вала в результате активного контакта с абразивной средой, износ самого бисера и уменьшение его размеров, а также забивание изношенным бисером сетки выпускного штуцера, что нарушает работу мельницы и снижает её производительность. Тонина помола пигмента регулируется величиной подачи шестерёнчатого насоса (производительности), что сказывается на времени воздействия бисера на перерабатываемый продукт. Контроль размеров частиц готовой краски проводится по клину.

Экспериментальная часть

Для устранения указанных недостатков и повышения эффективности процесса перетирания красящего пигмента предложено исключить трансмиссионную часть из рабочей камеры аппарата, а движение мелющей загрузки обеспечивать наложением на неё усилий электромагнитного поля. Для этого должны применяться металлические мелющие компоненты — дискретные ферромагнитные рабочие тела, хорошо поддающаяся влиянию магнитных полей. Причём, возможно сочетание металлических и неметаллических элементов в различных пропорциях для усиления эффекта перетирания. Схематически электромагнитная бисерная мельница показана на рисунке 2 [3, 4]. Конструктивно электромеханический дезинтегратор состоит из корпуса 1, двух плоских индукторов 2. На внутренней части магнитопровода 2 размещена многофазная обмотка, которая создаёт на его противоположных активных поверхностях встречные бегущие поля. В межиндукторном промежутке δ размещена рабочая камера 4, изготовленная из немагнитного износостойкого материала. Она установлена в зазоре δ с возможностью смещения в поперечном направлении, что необходимо для её обслуживания и замены в процессе эксплуатации. Во внутреннем пространстве рабочей камеры находятся дискретные рабочие тела 3, функцию которых могут выполнять различные ферромагнитные частицы (стержни, иглы). Конструкция загрузочного и разгрузочного патрубков предусматривает наличие ограничительных сеток для предотвращения выхода за пределы камеры мелющих элементов.

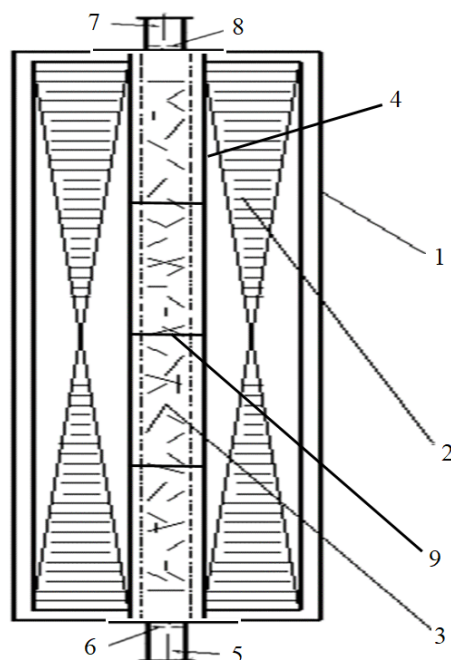


Рисунок 2 - Электромагнитная бисерная мельница: 1 — корпус; 2 — магнитопровод (индуктор); 3 — мелющая загрузка (рабочие тела); 4 — рабочая камера; 5 — загрузочный патрубок; 6, 8 — сетка; 7 — разгрузочный патрубок; 9 — перегородки

Основным принципом работы электромагнитной бисерной мельницы (ЭБМ) с плоским индуктором или установки активации процессов (УАП) является влияние бегущего электромагнитного поля высокой мощности и ферромагнитных частиц, которые находятся в рабочей зоне ЭБМ, на любое обрабатываемое вещество - газообразное, жидкое или твёрдое. Действие ЭБМ приводит к многократному росту скорости физико-химических и механо-физических реакций. Происходит переход от диффузионного режима к кинетическому. При этом обрабатываемые вещества изменяют своё строение на молекулярном уровне, а конечные продукты приобретают качественно новые свойства.

Аппарат работает следующим образом. При питании обмотки трёхфазным током на активной поверхности магнитопровода 2 возникает бегущее электромагнитное поле, под действием которого в пределах каждого полюсного деления τ , образуются результирующие вращающиеся магнитные поля, под действием которых возникает вихревое движение мелющих тел 3, осуществляющих технологическую обработку ингредиентов, находящихся в рабочей камере 4. Причём мелющие тела совершают сложные колебательные и вращательные движения и взаимное столкновение в рабочей камере измельчителя как между собой так и о стенки и перегородки камеры, где находится материал, подлежащий диспергированию на более мелкие компоненты.

В зависимости от конструктивного исполнения рабочей камеры, технологические процессы могут быть реализованы как в замкнутом, так и в непрерывном режимах.

Вследствие гравитационной силы при отсутствии электромагнитного поля все рабочие ферромагнитные тела опускаются на дно рабочей камеры и при электромагнитном воздействии будут обрабатывать материал только в пределах нижнего полюсного деления индуктора. Для предотвращения описанного эффекта служат горизонтальные перфорированные перегородки 9 установленные на границах полюсных делений.

На рисунке 3 показана физическая модель электромагнитной бисерной мельницы.

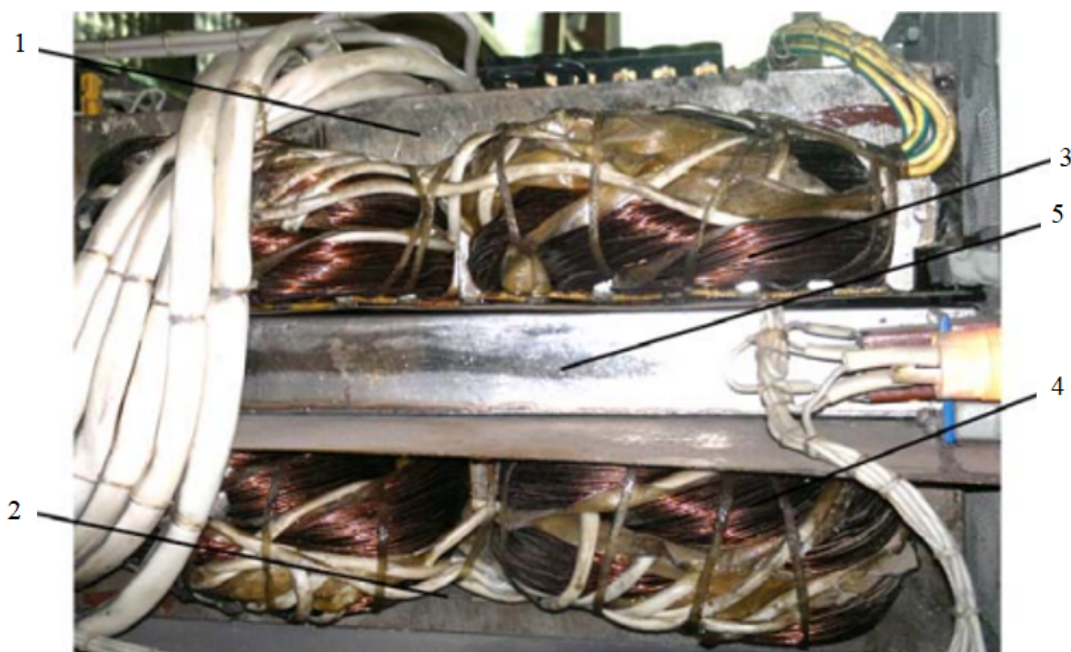


Рисунок 3 - Физическая модель измельчителя: 1, 2 — индукторы; 3, 4 — обмотки трёхфазного тока;
5 — измельчительная камера

Скорость вращения рабочих тел пропорциональна частоте электрического тока, протекающего в обмотке возбуждения и может варьироваться с помощью частотного преобразователя (рис. 4), обеспечивающего в пределах мощности до 4 кВт изменение частоты переменного трёхфазного тока в диапазоне от 0 до 200 Гц [5].



Рисунок 4 - Электроаппаратура для проведения экспериментов

Для математического описания динамики движения ферромагнитных тел можно применить теорию кинетической энергии и уравнения их движения.

Сила Лоренца (для заряженных частиц, если они двигались с зарядом) имеет вид:

$$F_L = q \cdot (E + V \cdot B), \quad (1)$$

где E — напряжённость электрического поля,

V — скорость движения частицы;

B — индукция магнитного поля,

q — заряд частицы.

Уравнение движения:

$$m \cdot \frac{dV}{dt} = F_{mag} + F_n, \quad (2)$$

где m — масса частицы;

t — время движения частицы;

F_{mag} — сила воздействия магнитного поля;

F_n — другие силы взаимодействия между частицами (столкновения и т.д.).

Для упругих столкновений между двумя сферическими телами:

$$V_{1к} = \frac{(m_1 - m_2) \cdot V_{1,init} + 2 \cdot m_2 \cdot V_{2,init}}{m_1 + m_2}, \quad (3)$$

$$V_{2к} = \frac{(m_2 - m_1) \cdot V_{2,init} + 2 \cdot m_1 \cdot V_{1,init}}{m_1 + m_2}, \quad (4)$$

Обоснование принципа действия устройства основывается на возникновении сил, действующих на ферромагнетики в неоднородном магнитном поле [6]:

$$\vec{F} = \vec{f} \cdot V_t = \frac{V_r \cdot \mu_0 \cdot (\mu_r - 1) \cdot grad H^2}{2}, \quad (4)$$

где f — плотность сил, действующих на ферромагнитные тела в магнитном поле;

V_T — часть объёма, занятого ферромагнитными мелющими телами;

μ_0 — магнитная проницаемость;

μ_r — относительная магнитная проницаемость;

H — модуль напряжённости магнитного поля.

Отсюда следует, что ферромагнитные мелющие тела втягиваются в область максимальной напряжённости магнитного поля. Экспериментальные исследования выявили, что движение металлических мелющих тел начинается при значении магнитной индукции составляющей 0,06 Тл, а при величинах 0,08...0,1 Тл интенсивность их движения сильно возрастает, что можно считать выходом в рабочий режим [7].

Измельчитель способен оказывать физическое воздействие на твёрдую и жидкую фазу (в том числе пигмент) посредством влияния электромагнитных, механических, электроакустических и акустических факторов с возникновением теплового эффекта, электролиза и кавитации. Это может быть использовано в организации технологических процессах тонкого и сверхтонкого измельчения, приготовления многокомпонентных смесей, перемешивании компонентов, приготовлении эмульсий и суспензий, обеззараживания веществ и материалов, ускорения химических реакций и повышения эффективности активации биологических процессов.

Исследования по измельчению железистоокисного пигмента, применяемого для получения чёрного окраса при производстве изделий из бетона, в качестве различных наполнителей, грунтовок и красок показали хорошие результаты применительно к работе физической модели электромагнитного измельчителя (табл. 1).

Таблица 1

Процентное содержание частиц после помола пигментов

Тип пигмента	Фракционный состав измельчённого пигмента, мкм				
	<100	100–160	160–200	200–1000	>1000
Железоокислый	38,4	33,8	7,3	9,8	10,7
Уголь	39,5	34,2	7,9	10,4	8

В течении 2 минут сухому измельчению подвергались уголь и железистоокисный пигмент исходной крупности до 10 мм. В дальнейшем планируется провести испытания физической модели электромагнитного измельчителя по диспергированию пигмента в жидкой среде, в том числе на основе олифы. Это даст возможность определения массогабаритных параметров экспериментального и опытного образцов таких аппаратов для приготовления лакокрасочных растворов.

Заключение

Таким образом, поведение частиц в электромагнитном поле является сложным взаимодействием между собой и стенками рабочей камеры под воздействием электромагнитного поля, что обеспечивает их движение и активное столкновение друг с другом. Динамика таких процессов обуславливается множеством факторов, таких как структуры заполнения объёма внутри рабочей камеры мельницы, конфигурации магнитного поля и условий окружающей среды. Для более подробного анализа потребуются учитывать уравнения движения для множества частиц и метод численного моделирования. Применение электромагнитного способа измельчения пигментов повысит эффективность получения лакокрасочной продукции, в том числе за счёт исключения из рабочей камеры быстро изнашиваемых подвижных частей бисерных мельниц. Практическая значимость заключается в снижении энергозатрат, увеличении производительности и широком спектре регулирования частиц крупности готового продукта

Список литературы

1. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности / П.М. Сиденко. – М.: Химия, 1977. – 368 с.
2. Авторское свид. СССР № 1706697 МПК В 02 С 17/16. Бисерная мельница / Алтухов В.Н., Левченко Э.П., Борисочкин Э.В.; заявитель и патентообладатель Коммунарский горно-металлургический институт. — № 4777846/33; заявл. 12.02.90; опубл. 23.01.92; Бюл. № 3.
3. Авторское свид. СССР № 1761273 МПК В 02 С 17/16, В 02 С 19/18. Бисерная мельница / Левченко Э.П., Алтухов В.Н., Онощенко А.Н., Зинченко А.М., Ромашкин В.А.; заявитель и патентообладатель Коммунарский горно-металлургический институт. — № 483233133; заявл. 29.05.90; опубл. 15.09.92; Бюл. № 34. — 3 с.: ил.
4. Левченко Э. П. Основы синтеза инновационных технологических процессов, механических устройств и систем (опыт 30-ти летней изобретательской деятельности): монография / Э.П. Левченко, А. М. Зинченко, О.А. Левченко. – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018. – 353 с.

5. Акимова О.И. Инновационные направления в разработке и проектировании роторно-ударных измельчителей: монография / О.И. Акимова, Э.П. Левченко, Д.А. Власенко. – Москва – Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. – 120 с.
6. Заблодский Н.Н. Оценка электромагнитных усилий в рабочей зоне электромеханического дезинтегратора / Н.Н. Заблодский, В.Ю. Грицюк, С.В. Шека // Сб. научн. тр. ДонГТУ. – № 39, 2013. – С. 212-216.
7. Филатов М.А. Электромагнитный способ измельчения материала и его применение для пробоприготовления в агломерационном производстве / М.А. Филатов, Э.П. Левченко, И.А. Карпук, В.Е. Зубков, А.В. Кащеев // Сб. научн. тр. ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ». – № 16 (59), 2019. – С. 47-52.

УДК 66.048.3.069.835

Хайдарова Л.М., Маннанов Т.И.

Исследование гидродинамики ситчатой тарелки методом CFD-анализа

Хайдарова Лейсан Маратовна – магистрант кафедры НХТ; khaydarova.2001@list.ru.

Маннанов Тимур Ильнурович – к.т.н., доцент кафедры НХТ;

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,

Россия, Уфа, 450064, ул. Космонавтов, д. 1

В тезисах приведены результаты расчетного исследования гидродинамики ситчатых тарелок с применением методов CFD-анализа. Получена расчетная область устойчивой работы ситчатой тарелки, рассчитано гидравлическое сопротивление ситчатой тарелки в зависимости от паровых и жидкостных нагрузок.

Ключевые слова: CFD-анализ, F-фактор, гидравлическое сопротивление, напряженность слива, ситчатая тарелка.

Investigation of the hydrodynamics of a sieve tray by CFD analysis

Khaydarova L.M.¹, Mannanov T.I.¹

¹ Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

The theses present the results of a computational study of the hydrodynamics of sieve trays using CFD analysis methods. The calculated area of stable operation of the sieve trays is obtained, the pressure drop of the sieve trays is calculated depending on steam and liquid flow rates.

Key words: CFD analysis, F-factor, pressure drop, weir load, sieve tray.

Введение

Ситчатые тарелки играют важную и незаменимую роль в процессах разделения и смешивания, которые имеют критическое значение в химической и нефтехимической отраслях. Эти устройства обеспечивают эффективное взаимодействие между различными фазами, что делает их ключевыми элементами в технологических процессах. Их эффективность напрямую зависит от устойчивости работы в различных гидродинамических условиях, что в свою очередь, критически важно для оптимизации процессов и повышения их общей производительности [1]. Гидродинамика ситчатых тарелок определяется несколькими ключевыми параметрами, среди которых особенно выделяются скорость потока, давление и температура. Оптимальная скорость потока жидкости, проходящей через тарелку, является критически важным фактором для обеспечения эффективного разделения фаз. Если скорость потока слишком высокая, это может вызвать явление струйного уноса жидкости, что негативно сказывается на работе устройства и может привести к снижению его эффективности. С другой стороны, слишком низкая скорость может привести к провалу жидкости, что также снижает эффективность процесса разделения. Поэтому давление и температура в системе должны поддерживаться в строго определенных пределах, чтобы предотвратить нежелательные гидродинамические явления, которые могут нарушить работу всего аппарата [2].

Устойчивость работы этих устройств непосредственно влияет на общую эффективность разделения фаз: оптимальные гидродинамические условия способствуют более быстрому и качественному отделению компонентов [3], что является ключевым аспектом в производственных процессах. Равномерное распределение потока также играет важную роль, так как оно помогает избежать смешивания фаз и обеспечивает высокое качество конечного продукта, что крайне важно для удовлетворения требований потребителей и стандартов качества.

При проектировании тарельчатых аппаратов обычно расчетным путем определяют скорости газа, которые соответствуют границам эффективного диапазона работы, а затем выбирают рабочую скорость. Нижняя граница — это скорость газа, при которой прекращается провал жидкости, а верхняя — скорость, при которой резко увеличивается унос жидкости. На значения этих скоростей оказывают влияние множество факторов, включая физико-химические свойства фаз, диаметр отверстий тарелок, их толщину и другие конструктивные особенности [2].

Многочисленные исследования посвящены определению верхней границы работы ситчатых тарелок, то есть нагрузки колонны по газовой фазе, при которой происходит резкое увеличение брызгоуноса. Величина уноса зависит от расстояния между тарелками, скорости газа в отверстиях, расстояния между отверстиями и свойств контактирующих фаз. Сложность явления уноса и множество определяющих факторов затрудняют получение зависимости, которая могла бы

учитывать все составляющие, что делает эту область исследования особенно актуальной и требующей дальнейшего изучения [4].

Моделирование гидродинамики ситчатых тарелок возможно проводить методами физического и математического моделирования. При физическом моделировании исследования производятся на стенде при подачи потоков пара и жидкости (чаще всего, вода и воздух) на реальную ситчатую тарелку, визуально фиксируется наличие уноса жидкости на вышележащую тарелку, наличие провала жидкости, а также фиксируется перепад давления на тарелке с применением дифференциального манометра [5]. Для математического моделирования применяется программный комплекс ANSYS CFX, позволяющий выполнять численное решение уравнений гидродинамики потоков жидкости: уравнение Навье-Стокса, уравнение сплошности и неразрывности потока, уравнение Эйлера и уравнение Бернулли [6]. Применение компьютерного моделирования позволяет экономить ресурсы, по сравнению с физическим моделированием, а также выполнять расчеты на полноразмерные модели, избегая неточностей, возникающих при масштабировании физического эксперимента. Однако применение программы ANSYS CFX требует высоких вычислительных мощностей компьютера.

Настоящая работа посвящена расчетному определению области устойчивой работы ситчатой тарелки.

Экспериментальная часть

Для моделирования принята ситчатая тарелка диаметром 1000 мм, на полотне которой расположены отверстия диаметром 20 мм, ширина переливного кармана составляет 100 мм. Высота сливной планки равна 50 мм. Для получения универсальной области устойчивой тарелки использую удельные паровые и жидкостные нагрузки, такие, как F-фактор (1) и напряженность слива (2):

$$F = \frac{V_{\text{п}}}{S_{\text{п}}} \sqrt{\rho}, \quad (1)$$

где F – значение F-фактора, $\text{Па}^{0,5}$;
 $V_{\text{п}}$ – объемный расход пара, $\text{м}^3/\text{с}$;
 $S_{\text{п}}$ – рабочее сечение тарелки, м^2 ;
 ρ – плотность пара, $\text{кг}/\text{м}^3$.

$$L_v = \frac{V_{\text{ж}}}{b}, \quad (2)$$

где L_v – значение напряженности слива, $\text{м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$;
 $V_{\text{ж}}$ – объемный расход жидкости, $\text{м}^3/\text{ч}$;
 b – длина переливной планки, м.

Расчет в ANSYS CFX, проведен с применением модели турбулентности потока k-ε, успешно применяемой для решения подобных задач [7,8]. Расчетная сетка тетраэдрической формы, размер элемента сетки 10 мм, размер элемента сетки внутри отверстий уменьшается до 1 мм, что необходимо для правильного и адекватного расчета гидродинамических явлений в пограничном слое.

По результатам выполнения серии расчетов получена область устойчивой работы ситчатой тарелки, приведенная на рис. 1.

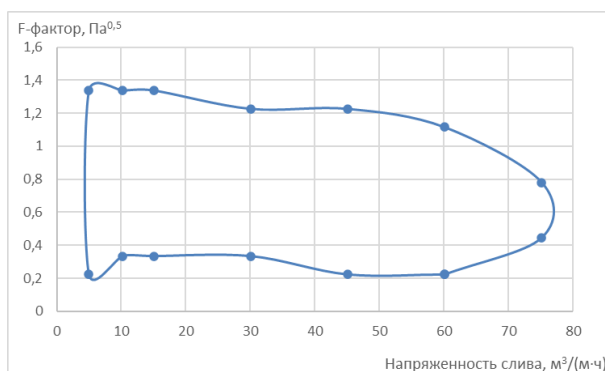
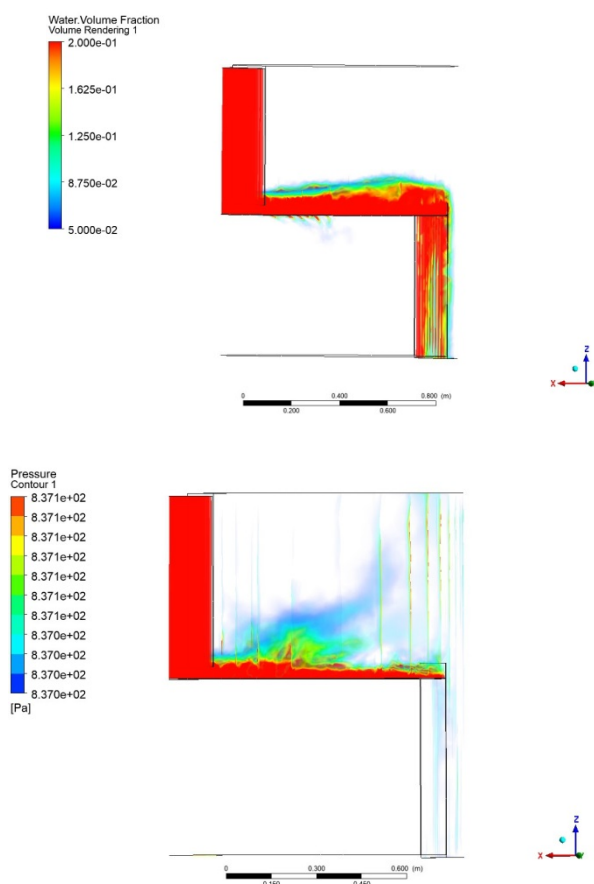


Рисунок 1 - Расчетная область устойчивой работы ситчатой тарелки

При снижении паровой нагрузки ниже минимума наблюдается провал жидкости, что можно увидеть из визуализации расчетов, приведенной на рис. 2а. На рис. 2б приведена визуализация уноса жидкости на верхнюю тарелку, которая возникает при превышении значения максимального допустимого F-фактора.



б

Рисунок 2 - Визуализация потока жидкости на ситчатой тарелке:
а) при $F = 0,1 \text{ Па}^{0,5}$, $L_V = 60 \text{ м}^3/(\text{м} \cdot \text{ч})$, б) при $F = 0,9 \text{ Па}^{0,5}$, $L_V = 75 \text{ м}^3/(\text{м} \cdot \text{ч})$

Расчетным способом в программе ANSYS CFX определены значения гидравлического сопротивления ситчатых тарелок в зависимости от удельных паровых и жидкостных нагрузок, результаты приведены на графике на рис. 3.

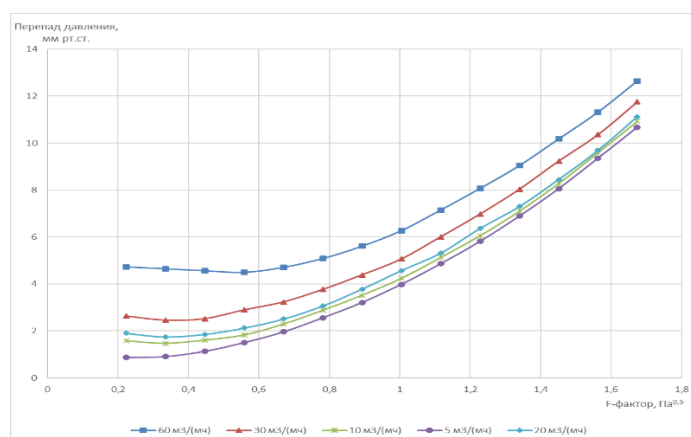


Рисунок 3 - Зависимость гидравлического сопротивления ситчатой тарелки от F-фактора и напряженности слива

Зависимость перепада давления от F-фактора, и, соответственно, скорости парового потока имеет квадратичный характер, что соответствует уравнению Дарси-Вейсбаха. Увеличение гидравлического сопротивления при увеличении напряженности слива, и, соответственно, скорости жидкостного потока, связана с увеличением высоты слоя жидкости на тарелке. Чем больше слой жидкости на тарелке, тем больше энергии требуется затратить для преодоления этого слоя жидкости паровым потоком. Следует отметить, что при напряженности слива $20 \text{ м}^3/(\text{м}\cdot\text{ч})$ в рабочем режиме (диапазоне F-фактора от 0,35 до $1,3 \text{ Па}^{0,5}$) перепад давлений изменяется от 2 до 7,5 мм рт. ст., что соответствует экспериментальным данным, приведенным в работе [9].

Заключение

Таким образом, методом CFD-анализа построена область устойчивой работы ситчатой тарелки, а также определена зависимость гидравлического сопротивления от удельных парожидкостных нагрузок. Полученные области устойчивой работы ситчатых тарелок имеют хорошую сходимость с практическим опытом применения. Зависимость гидравлического сопротивления от скорости пара и жидкости на тарелке имеют теоретическое обоснование, а также сходимость с результатами физического моделирования тарелок на стенде.

Список литературы

1. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Минеев Н.Г. Основы расчета и модернизация теплообменных установок в нефтехимии: монография. - Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2010. – 574 с.
2. Кириллов А.В. Расчет контактных устройств тарельчатых колонных аппаратов: уч. пособие. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2014. – 70 с.
3. Rahmonov T.Z. Creation of highly effective devices for purification of natural gas // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2015. № 4. P. 472–476.
4. Тарасова Т. А., Дмитриев Е.А., Куликов М. В. Определение верхней границы диапазона устойчивой работы ситчатой тарелки // Успехи в химии и химической технологии. 2015. №2. С. 71-73.
5. Лесной Д.В., Маннанов Т.И., Константинов Е.К., Муллабаев К.А., Чуракова С.К. Исследовательский полномасштабный стенд для определения граничных областей гидродинамической устойчивости контактных устройств фракционирующего оборудования // Новые направления работ на нефть и газ, инновационные технологии разработки их месторождений, перспективы добычи нетрадиционного углеводородного сырья: материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Оренбург, 2019. – С. 172-175.
6. Маннанов Т.И., Чуракова С.К., Лесной Д.В., Константинов Е.К., Муллабаев К.А. CFD-анализ – современный подход к исследованию процесса разделения и распределения потоков в устройствах ввода сырья массообменных аппаратов // Булатовские чтения, 2020. – Т.5. – С. 159-165.
7. Lavasani M.S., Rahimi R., Zivdar M. Experimental and CFD investigation for predicting weeping from sieve trays of Divided Wall column // International Biennial Oil, Gas and Petrochemical Conference. 2018. № 2. P. 1-14.
8. Захарова Д.Н., Вильданов Ф.Ш., Ахметов Р.Ф., Рахимов Т.Х., Чуракова С.К. CFD – анализ ситчатой тарелки // Башкирский химический журнал. – 2019. – Т. 26, № 2. – С. 121-126.
9. Лесной Д.В. Совершенствование конструктивного оформления теплообменных и массообменных аппаратов. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. Уфа: ФГБОУ ВО УГНТУ, 2021.

УДК 66.0:519.876.5

Хамадалиев Р.Ф., Кичатов К.Г., Просочкина Т.Р.

Цифровой и экспериментальный инжиниринг нефтегазохимических процессов в УГНТУ

Хамадалиев Руслан Фанисович – аспирант кафедры нефтехимии и химической технологии;

Кичатов Константин Геннадьевич – к.х.н., доцент кафедры нефтехимии и химической технологии,

Kichatov_k@mail.ru;

Просочкина Татьяна Рудольфовна – д.х.н., профессор, заведующий кафедрой нефтехимии и химической технологии

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (УГНТУ),

Россия, Уфа, 450064, Космонавтов, дом 1.

Рассмотрены вопросы применения цифровых и натуральных методов исследования для систематического анализа процессов, характерных для нефтегазохимических систем на различных уровнях их организации. Описаны подходы, применяемые для прогнозирования и создания новых материалов на основе базовых полимеров с необходимыми заказчику свойствами, формирования цифровых двойников оборудования и технологических процессов для оптимизации режимов получения материалов, реализуемых в лабораторных и промышленных условиях.

Ключевые слова: нефтегазохимия, цифровой двойник, нейронные сети, материалы, моделирование

Digital and experimental engineering of petrochemical processes at USPTU

Khamadaliev R.F., Kichatov K.G., Prosochkina T.R.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ufa State Petroleum Technological University" (USPTU),

Russia, Ufa, 450064, Kosmonavtov, Building 1.

The article considers the issues of using digital and natural research methods for systematic analysis of processes characteristic of petrochemical systems at various levels of their organization. It describes approaches used to predict and create new materials based on basic polymers with the properties required by the customer, to form digital twins of equipment and technological processes to optimize the modes of obtaining materials implemented in laboratory and industrial conditions.

Keywords: oil and gas chemistry, digital twin, neural networks, materials, simulation

Введение

Мировой рынок новых материалов для машиностроения, авиационной и космической отраслей, медицины, строительства и др. характеризуется значительным темпом роста в 7,1 % ежегодно, и к 2032 г. его объем составит \$ 131 млрд. Большую долю этого рынка (более 55 %) занимают композиционные материалы, среди которых преобладают материалы на полимерной основе – термопластичные и термореактивные. В нашей стране, по прогнозам, развитие рынка композиционных материалов будет более бурным – экономисты ждут прироста этого сегмента 10-15 % ежегодно, что позволит к 2030 г. нарастить объем производства этого вида продукции в денежном эквиваленте \$ 49 млрд. Химическая технология основного органического и нефтегазохимического синтеза является поставщиком мономеров и других веществ (растворителей, добавок, катализаторов и инициаторов) для производства полимеров и продукции на их основе.

Ожидается и сильное развитие мирового рынка филаментов – материалов для 3D-печати и аддитивных производств – до \$ 60 млрд. к 2030 г. В РФ эта отрасль пока характеризуется невысокими темпами развития. Ожидается, что с 2023 г. по 2028 г. этот рынок вырастет с 12 до 58 млрд рублей.

В связи с вышеизложенным, создание новых веществ и рецептур материалов с необходимыми заказчиком свойствами – физическими, физико-химическими, механическими и эксплуатационными, а также разработка технологий их получения не только в лабораторных условиях, но и масштабирование их до промышленных применений, является актуальной проблемой, которую необходимо решить для ответа на вызовы, стоящие перед страной в области импортозамещения и импортоопережения. Эта цель поставлена перед химиками-технологами в Указе Президента Российской Федерации от 18.06.2024 г. № 529 «Об утверждении приоритетных направлений научно-технологического развития и перечня важнейших наукоемких технологий».

Цифровой и экспериментальный инжиниринг нефтегазохимических процессов для решения задач импортозамещения и импортоопережения

В УГНТУ кафедрой нефтехимии и химической технологии уже несколько десятилетий ведутся исследования, в основу которых заложен многомасштабный иерархический подход к анализу нефтегазохимических систем и процессов на различных уровнях их организации (рис. 1), что позволяет взглянуть на решение проблемы разработки новых материалов и технологий их получения комплексно с применением широкой линейки натуральных и цифровых методов (рис. 1).

Проект «Цифровое прогнозирование и проектирование веществ с заданными свойствами» реализуется нами в рамках Государственной программы ПРИОРИТЕТ 2030. Целью проекта является создание программно-аппаратного комплекса (ПАК) на основе цифровой интеллектуальной системы по прогнозированию и проектированию полимерных и композиционных материалов с заданными свойствами, который позволит не только значительно сократить время на разработку перспективных рецептур новых материалов, но и создавать кастомизированные продукты на основе базовых полимеров.

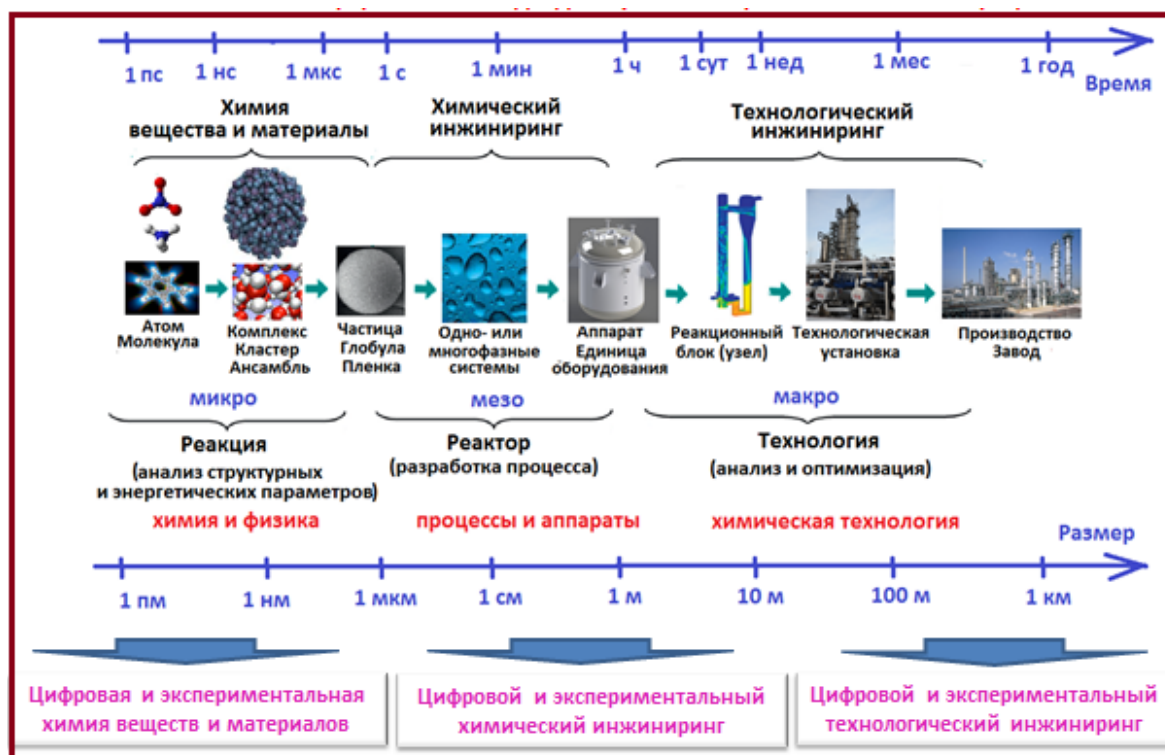


Рисунок 1 - Схема масштабного иерархического подхода к изучению нефтегазохимических систем и процессов.

С применением методов молекулярной механики и динамики, квантовой химии, Монте-Карло, конечных элементов определяются структурные характеристики веществ и материалов, и проводится прогноз их необходимых свойств. Так, например, осуществлен прогноз ряда физических и механических свойств полимерного композиционного материала – полиэтилентерефталата (ПЭТ) с углеродными нанотрубками [1].

Разработан цифровой двойник оборудования, позволяющий на основе структурных характеристик полимерных материалов на основе ПЭТ, осуществлять оптимизацию технологического режима производства филaments для 3D-печати [2].

С применением созданной нами и постоянно пополняемой прототипа базы данных полимеров, добавок, наполнителей и композиционных материалов на их основе [3] и программы управления ею с возможностью прямого поиска материалов-кандидатов по характеристикам [4], нами осуществлен прогноз, и последующее получение материала полиуретана с заданными потребительскими свойствами (рис. 2): предел прочности при растяжении – не менее 70 МПа; плотность не менее 1200 кг/м³; модуль Юнга не менее 1700 МПа.

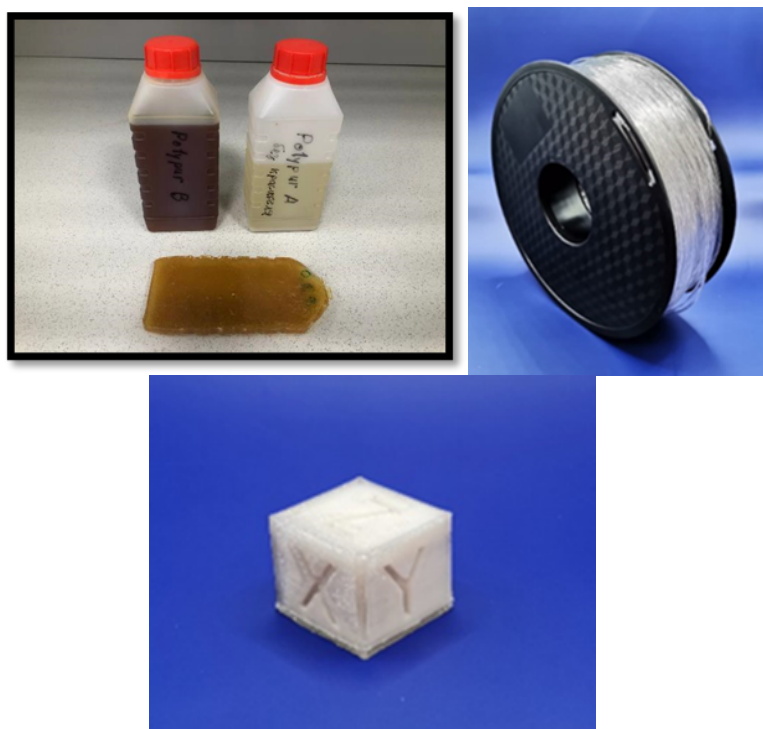


Рисунок 2 - Образцы полиуретана с заданными свойствами и компоненты для его получения и филамента для 3D-печати, полученные путем переработки отхода - пыли ПЭТ.

Кроме того, получены перспективные образцы филаментов для 3D-печати:

- на основе композиционных материалов из базовых полимеров полиэтилена (3 марки) и полипропилена (4 марки) с доступными минеральными наполнителями (карбонат кальция и тальк);
- из отхода производства – пыли ПЭТ и ПЭТ вторичной переработки.

Для определения в реальном времени оптимальных параметров режимов работы технологических установок и автоматического поддержания их значений, в промышленных решениях незаменимы цифровые двойники на основе нейронных сетей. С их помощью становится возможным вскрыть скрытые взаимосвязи химико-технологических параметров с показателями эффективности нефтегазохимического бизнес-процесса.

Таким образом виртуальная копия аппарата, установки или всего производства – цифровой двойник – помогает спрогнозировать проблемы еще до их возникновения, тем самым обеспечивая безопасность и бесперебойность осуществления процесса, что важно для снижения потерь при переходе на новую марку или рецептуру материала. Принципы создания цифрового двойника технологического процесса приведены в статье [5] и проиллюстрированы на рис. 3.

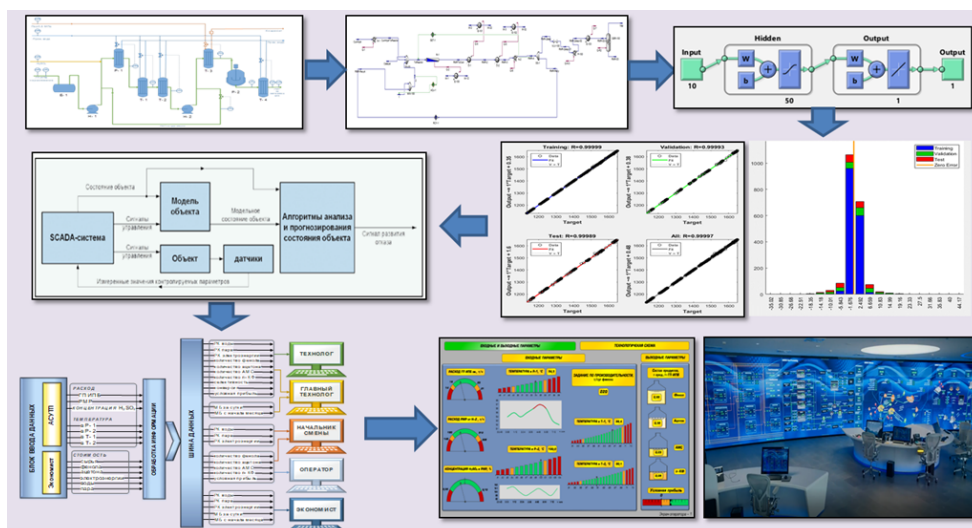


Рисунок 3 – Этапы разработки цифровых двойников для оптимизации технологических процессов.

Этапы разработки цифрового двойника включают: формирование базы исходных данных нефтехимического процесса, разработку виртуальной модели процесса, выбор топологии и алгоритма обучения нейронной сети, оценку адекватности нейросетевой модели, расчет коэффициентов передаточных функций, выбор интеллектуальной системы управления процессом и ее программирование, тестирование и пилотные испытания интеллектуальной системы.

Заключение

Для полного понимания и систематического описания нефтегазохимических систем, по нашему мнению, рекомендуется применять разнообразные экспериментальные методики и варианты компьютерного моделирования на различных уровнях их организации. Такой многомасштабный подход позволяет не только вскрыть внутренние взаимосвязи в этих объектах, но и осуществить прогнозирование их характеристик и процессов, происходящих в них.

Список литературы

1. Gabitov, A. K. Prediction of the Properties of Polyethylene Terephthalate and its Carbon Nanotube Composites / A. K. Gabitov, T. R. Prosochkina, K. G. Kichatov // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2024. – Vol. 60, No. 1. – P. 43-51.
2. Development of a Digital Twin of the Extruder for Production of Filament from Low Density Polyethylene / I. I. Gumerov, A. K. Ivlev, K. G. Kichatov, T. R. Prosochkina // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. – 2024. – Vol. 60, No. 1. – P. 37-42.
3. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022622324 Российская Федерация. БАЗА данных полимеров, композиционных материалов и их свойств "Smart Polymer and Composite Database": № 2022622223: заявл. 14.09.2022: опубл. 22.09.2022 / К. Г. Кичатов, Т. Р. Просочкина, А. В. Караськина [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022668153 Российская Федерация. Программа управления базой данных полимеров и композитов "Smart Polymer and Composite Data Manager": № 2022666828: заявл. 14.09.2022: опубл. 04.10.2022 / К. Г. Кичатов, Т. Р. Просочкина, А. В. Караськина [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет».
5. Kichatov, K. G. Principles of creating a digital twin prototype for the process of alkylation of benzene with propylene based on a neural network / K. G. Kichatov, T. R. Prosochkina, I. S. Vorobyova // Fine Chemical Technologies. – 2023. – Vol. 18, No. 5. – P. 482-497.

УДК 665.6: 665.6/7

Хурматов А.М., Ахмедова К.Ш., Худойберганов А.А.

Фракционная перегонка пиролизного дистиллята

Хурматов Абдугаффор Мирзабдуллаевич, Д.т.н. Профессор

Алмалыкский филиал Ташкентский Государственный Технический Университет имени И.Каримова, Республики Узбекистан город Алмалык

Ахмедова Кумуш Шахобиддин кизи, PhD докторант Институт общей и неорганической химии

Академия Наук Республики Узбекистан, город Ташкент Мирзо Улугбек 77а,

kumushpardaeva98@gmail.com

Худойберганов Аббор Акбарович, АО «Узбекнефтегаз», Республики Узбекистан город Ташкент

В данной работе рассмотрены методы переработки пиролизные дистилляты. Особое внимание уделено процессу перегонки, который занимает центральное место в технологии нефтепереработки. Фракционный состав пиролизного дистиллята является важным параметром, определяющим его потенциальное применение в качестве топлива или сырья для нефтехимической промышленности. Определение фракционного состава позволяет оптимизировать процессы переработки и рационально использовать продукты пиролиза. В работе исследован фракционный состав пиролизного дистиллята методом лабораторной перегонки при атмосферном давлении в соответствии со стандартом ASTM D 86. Перегонка проводилась с последовательным выделением фракций в зависимости от температуры кипения, характеризуемой начальными (Тнк) и конечными (Ткк) значениями. Метод позволяет оценить содержание легких, средних и тяжелых фракций, что даёт возможность прогнозировать их свойства и определять направления дальнейшей переработки. Полученные дистилляты могут быть использованы для анализа углеводородного состава, определения физико-химических характеристик и разработки технологий глубокой переработки. Представленные результаты служат основой для повышения эффективности использования пиролизного дистиллята и его интеграции в существующие нефтехимические процессы.

Ключевые слова: дистилляция, дизельное топливо, температура, пиролизный дистиллят.

Fractional distillation of pyrolysis distillate

Khurmamatov A.M.¹, Ahmedova K.S.², Khudoyberganov A.A.³

¹Almalyk Branch of Tashkent State Technical University named after I. Karimov, Almalyk, Republic of Uzbekistan

²Institute of General and Inorganic Chemistry, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, 77a Mirzo Ulugbek Street, Tashkent, Republic of Uzbekistan

³JSC "Uzbekneftegaz", Tashkent, Republic of Uzbekistan

This paper discusses the methods of processing pyrolysis distillates, with special attention given to the distillation process, which plays a central role in petroleum refining technology. The fractional composition of pyrolysis distillate is a key parameter that determines its potential use as fuel or feedstock for the petrochemical industry. Determining the fractional composition helps optimize refining processes and efficiently utilize pyrolysis products. The study investigated the fractional composition of pyrolysis distillate using laboratory distillation at atmospheric pressure in accordance with ASTM D 86. Distillation was carried out with sequential fraction collection based on boiling temperature ranges, characterized by initial (IBP) and final boiling points (FBP). This method allows for assessing the content of light, middle, and heavy fractions, which provides insight into their properties and possible processing directions. The resulting distillates can be used for hydrocarbon composition analysis, determination of physicochemical properties, and development of deep processing technologies. The results presented serve as a basis for improving the efficiency of pyrolysis distillate utilization and its integration into existing petrochemical processes.

Keywords: distillation, diesel fuel, temperature, pyrolysis distillate.

Пиролизный дистиллят, являющийся побочным продуктом производства полиэтилена и полипропилена на совместном предприятии Uz-Kor Gas Chemical, представляет собой жидкость желтого цвета с резким запахом, состоящую из смеси углеводородов, по свойствам близких к бензину и керосину. Этот продукт образуется в процессе пиролиза. Переработка пиролизного дистиллята для получения топливных продуктов осуществляется с использованием оборудования и методов, применяемых при вторичной переработке нефти [1].

Фракционный состав пиролизного дистиллята является ключевым показателем, позволяющим оценить его характеристики и определить возможности дальнейшего применения в качестве топлива или сырья для нефтехимической отрасли. Анализ фракционного состава способствует оптимизации технологических процессов переработки и повышению эффективности использования продуктов пиролиза. Определение фракционного состава осуществляется методом лабораторной перегонки, при котором фракции с различными диапазонами температур кипения последовательно отгоняются по мере повышения температуры. Каждая фракция характеризуется начальной (Тнк) и конечной (Ткк) температурами кипения, которые зависят от химической природы углеводородов, входящих в её состав. Экспериментальные перегонки пиролизного дистиллята проводились в периодическом режиме при атмосферном давлении в соответствии с международным стандартом ASTM D 86. Этот метод позволяет определить фракционный состав сырья и продуктов его переработки по истинной температуре кипения (ИТК), оценить потенциальное содержание отдельных фракций и выделить дистиллятные пробы для дальнейшего анализа их состава и физико-химических свойств [2].

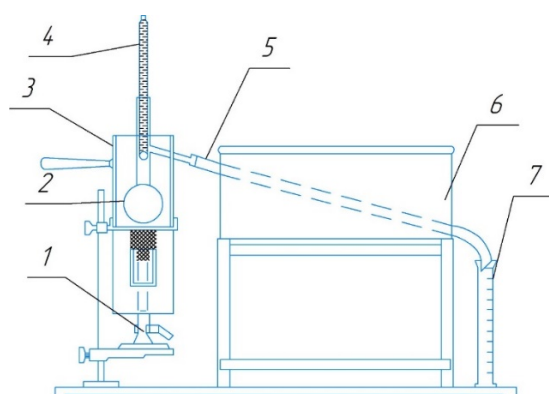


Рисунок 1 - Схема установки для разгонки пиролизного дистиллята [3]. 1 - горелка газовая; 2 - колба стеклянная круглодонная; 3 - кожух железный; 4 - термометр; 5 - холодильник; 6 - ванна с проточной водой; 7-градуированный приемник для дистиллята

Рис. 1 показано ручная дистилляционная установка. Основные компоненты дистилляционной установки включают колбу для дистилляции, конденсатор и соответствующую охлаждающую ванну, металлический щит или ограждение для колбы, источник нагрева, подставку для колбы, устройство измерения температуры и приемный цилиндр для сбора дистиллята [3].

В таблице 1 приведены результаты серии опытов по определению фракционного состава пиролизного дистиллята (% по массе) путем перегонки под атмосферным давлением при температурах разгонки от 40 до 168 °С.

Таблица 1

Основные результаты опытов по перегонке пиролизного дистиллята

Основные результаты опытов по перегонке спиртового дистиллята					
№	Наименование показателей	Опыты			
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
1	Плотность при 20 °С, кг/м ³	825			
2	Кинематическая вязкость при 40 °С, мм ² /с	5,8			
3	Фракционный состав:				
	Температура начало кипения, °С:	40			
	10 %	59	62	60	57
	20 %:	73	70	72	71
	30 %	83	82	84	80
	40 %	88	91	90	92
	50 %	96	98	94	97
	60 %	102	108	100	104
	70 %	128	125	130	127
	80 %	152	148	150	146

4	90 %	162	160	165	168
	93 %	162	163	167	170
	Температура конца кипения, °С	134	163	167	170
5	Выход, %	91	89	94	92
6	Остаток, %	6,7	9	4,3	6,5
7	Потери, %	2,3	2	1,7	1,5

Как видно из данных таблицы, что среднее значение измеренной плотности пиролизного дистиллята при стандартной температуре (20 °С) равна $\rho_{20} = 825 \text{ кг/м}^3$, а значения коэффициента его кинематической вязкости составляет $\nu_{20} = 5,8 \text{ мм}^2/\text{с}$.

Начальная температура кипения или температура, при которой конденсируется и отрывается первая капля жидкости, пиролизного дистиллята во всех опытах одинаковая и составляет $T_{\text{нк}} = 40 \text{ °С}$. Результаты разгонки образцов дистиллята (60-165 °С) показывают, что образованные в ходе опытов дистилляты по температурному пределу выкипания соответствуют бензиновой фракции (к.к.- 180 °С). По итогам каждого эксперимента рассчитали выход фракций, который составляет 90÷95 %, а величина потери колеблется в пределах от 1,2 до 2,0 %.

На рис. 2.3 приведена кривая фракционного состава пиролизного дистиллята по однократному испарению (ОИ) при температурах разгонки 40÷165 °С, построенная по данным опыта № 3 [4].

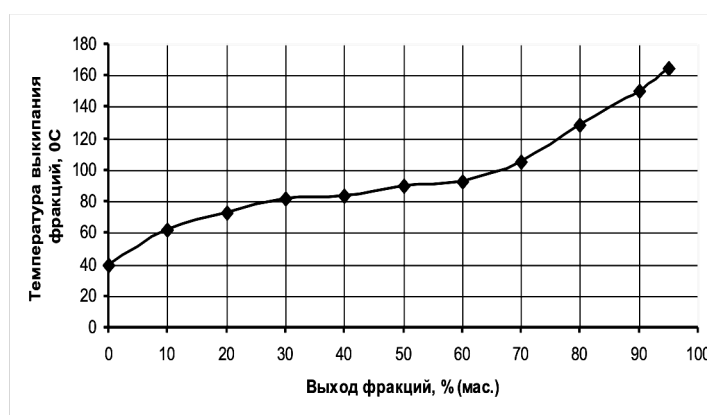


Рисунок 2 - Кривая фракционного состава пиролизного дистиллята [4]

Как видим, путем атмосферной перегонки пиролизного дистиллята можно получить фракции дистиллятов с температурными пределами 40÷165°С в объеме более 80 % и 150÷200 °С, что соответствуют фракциям бензина и керосина соответственно.

Таким образом, результаты проведенных лабораторных исследований показали возможности использования пиролизного дистиллята в качестве эффективного сырья для получения светлых нефтепродуктов путем его атмосферной перегонки. Опыты подтвердили, что выход светлых фракций из пиролизного дистиллята равняется 89÷94 %, в котором доля фракции бензина (40÷165 °С) составляет более 80 %, а потери не превышает 1,5÷2,3 %.

Список литературы

1. Hydrocarbon-conversion reaction and new paraffin-kinetic model during straight-run gas oil (SRGO) hydrotreating. Kui Zhang, Zhihai Hu, Ping Yang, Guangle Zhao, Liang Ren, Hong Nie, Wei Han <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2024.100246>
2. Advanced hydroprocessing techniques for improved fuel refining. Xurmatov A.M., Akhmedova K.Sh. Science and Education in Karakalpakstan. 2024 №4/2 ISSN 2181-9203. 177-182 b.
3. ASTM D86-23ae1. Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products and Liquid Fuels at Atmospheric Pressure <https://www.astm.org/standards/d86>
4. Ахмедова К.Ш., Хурматов А.М., Сидиков Г.О. Результаты получения пиролизного дистиллята- синтетического топлива из изношенных шин // Universum: технические науки: электрон. Научн. Журн. 2024. 6(123). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/17737>. doi-10.32743/unitech.2024.123.6.17737

Шишанов М.В., Кук Х.Г., Геворкян Э.Л., Друзьяк С.Н., Ботнев А.Ю.

Моделирование кинетики получения изофорона в различных реакторах

Шишанов Михаил Валентинович – к.т.н., доцент кафедры ХТУМ;

Кук Христофор Герман – аспирант; kuk.khristofor@inbox.ru.

Геворкян Элиза Липаридовна – студент; gevorgyan.e.l@mail.ru.

Друзьяк Станислав Николаевич – студент; kuk.k@muctr.ru.

Ботнев Александр Юрьевич – студент; leksandr.botnev@mail.ru.

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В тезисах рассмотрено кинетическое моделирование процесса получения изофрона. Изофрон – химическое вещество, использующиеся для получения лакокрасочных материалов горячей сушки, а также как растворитель для органического синтеза. В рамках текущей работы сформулирован механизм самоконденсации ацетона. Получены кинетические параметры исследуемого процесса. Используются различные постановки гидродинамического профиля реактора: реактор идеального смешения, реактор идеального вытеснения. Для решения поставленных задач использовался математический подход решения системы дифференциальных уравнений.

Ключевые слова: органическая химия, кинетическое моделирование, изофрон, механизм реакции.

Kinetic modeling of the reaction of obtaining isophorone in different reactors

Shishanov M.V., Kuk Kh.G., Gevorgyan E.L., Druzyak S.N., Bothev A.Y.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

Russia, Moscow, 125047, Miusskaya square, house 9.

The abstract considers kinetic modeling of the process of obtaining isophrone. Isophrone is a chemical substance used to obtain hot-drying paints and varnishes, and also as a solvent for organic synthesis. In the current work, the mechanism of acetone self-condensation was formulated. The kinetic parameters of the process under study were obtained. Various formulations of the hydrodynamic profile of the reactor were used: a reactor of ideal mixing, a reactor of ideal displacement, a microchannel. To solve the problems, a mathematical approach was used to solve a system of differential equations and computational modeling.

Keywords: organic chemistry, kinetic modeling, isophorone, reaction mechanism.

Введение

Изофрон производится путем конденсации ацетона в жидкой фазе при температуре около 200 °С и давлении 3.6 МПа в присутствии водного раствора гидроксида калия (около 10 масс. %) [1].

В работах [2-3] предложена последовательность стадий протекания конденсации ацетона в водно-щелочной среде. При обработке эксперимента была выбрана следующая схема (Рисунок 1).

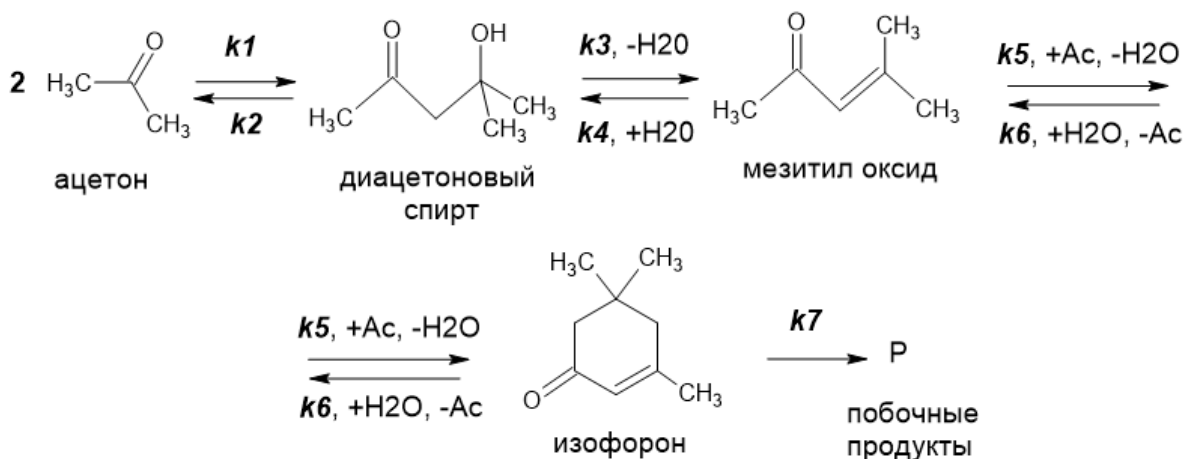


Рисунок 1 - Схема последовательности реакций альдольной самоконденсации ацетона

С целью изучения кинетики получения изофрона была поставлена серия экспериментов в автоклаве с магнитной мешалкой, используя в качестве реагентов ацетон и раствор щёлочи.

Экспериментальная часть

В реактор автоклав объёмом 100 мл помещают 10,324 моль/л ацетона, 13,5 моль/л воды, 1 мл 10% раствора NaOH. Автоклав закрыли и продули инертным газом (азот). Включали мешалку (число оборотов (300-500 об/мин). На контроллере устанавливали температуру реакции (130 - 200 °С, в зависимости от условий процесса) и включали обогрев рубашки. Пробы отбирали в течении 1.5 часа, объем проб 0.15 – 0.2 мл. Пробоотборник представлял собой стальной капилляр с игольчатым вентилем, опущенный до дна обечайки реактора. По окончании реакции отключали нагрев и давали автоклаву остыть до комнатной температуры. Реактор открывают, реакционную массу сливают в колбу.

Для кинетического моделирования реакции в постановке реактора идеального смешения (РИС) использовали следующий механизм (1) –(6):

$$ac'(t) = -2 * k_1 * ac(t)^2 - k_5 * om(t) * ac(t) + 2 * k_2 * das(t) + k_6 * ip(t) * wat(t), \quad (1)$$

$$das'(t) = k_1 * ac(t)^2 - k_2 * das(t) - k_3 * das(t) + k_4 * om(t) * wat * (t), \quad (2)$$

$$om'(t) = k_3 * das(t) - k_4 * om(t) * wat(t) - k_5 * das(t) * ac(t) + k_6 * ip(t) * wat(t), \quad (3)$$

$$ip'(t) = k_5 * das(t) * ac(t) - k_6 * ip(t) * wat(t) - k_7 * ip(t), \quad (4)$$

$$P'(t) = k_7 * ip(t), \quad (5)$$

$$wat'(t) = k_3 * das(t) - k_4 * om(t) * wat(t) + k_5 * das(t) * ac(t) - k_6 * ip(t) * wat(t), \quad (6)$$

Где ac -концентрация ацетона, das -концентрация диацетонового спирта, om -концентрация мезитилоксида, ip -концентрация изофорона, wat -концентрация воды, P -концентрация побочных продуктов.

Было проведено решение системы дифференциальных уравнений, включающее в себя описание констант моделью (7),

$$k(T) = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_{\text{акт}}}{R \cdot T}\right), \quad (7)$$

где k_0 – предэкспоненциальный множитель; $E_{\text{акт}}$ – энергия активации, Дж/моль; $R=8.314$ [Дж/(моль·К)] – универсальная газовая постоянная; T – температура, К; b – температурная поправка предэкспонента

В результате исследований, были получены следующие кинетические параметры реакции: $k_{01}=9,624 \cdot 10^4$, $E_{\text{акт}1}= 53129$, $k_{02}=1,892 \cdot 10^8$, $E_{\text{акт}2}= 57584$, $k_{03}=3,42 \cdot 10^4$, $E_{\text{акт}3}= 32187$, $k_{04}=172,845$, $E_{\text{акт}4}=22437$, $k_{05}=8.347 \cdot 10^3$, $E_{\text{акт}5}= 52731$, $k_{06}=1,9991 \cdot 10^3$, $E_{\text{акт}6}= 54397$, $k_{07}=4,729 \cdot 10^4$, $E_{\text{акт}7}= 93208$.

Далее, был проведен трансфер кинетических параметров в гидродинамическую постановку реактора идеального вытеснения (РИВ), используя следующие параметры: число трубок 1, массовый расход 1 мл/мин, внутренний диаметр 0.001 м. Для моделирования кинетики использовали следующий подход (8) – (13):

$$ac'(l) = \frac{-2 * k_1 * ac(l)^2 - k_5 * om(l) * ac(l) + 2 * k_2 * das(l) + k_6 * ip(l) * wat(l)}{w * 60}, \quad (8)$$

$$das'(l) = \frac{k_1 * ac(l)^2 - k_2 * das(l) - k_3 * das(l) + k_4 * om(l) * wat * (l)}{w * 60}, \quad (9)$$

$$om'(l) = \frac{k3 * das(l) - k4 * om(l) * wat(l) - k5 * das(l) * ac(l) + k6 * ip(l) * wat(l)}{w * 60}, \quad (10)$$

$$ip'(l) = \frac{k5 * das(t) * ac(t) - k6 * ip(t) * wat(t) - k7 * ip(t)}{w * 60}, \quad (11)$$

$$P'(l) = \frac{k7 * ip(l)}{w * 60}, \quad (12)$$

$$wat'(l) = \frac{k3 * das(l) - k4 * om(l) * wat(l) + k5 * das(l) * ac(l) - k6 * ip(l) * wat(l)}{w * 60}, \quad (13)$$

Где l – длина канала, w – скорость потока в реакторе, рассчитанная из вышеперечисленных параметров. В результате кинетического моделирования получили следующие результаты (Рисунок 2-3):

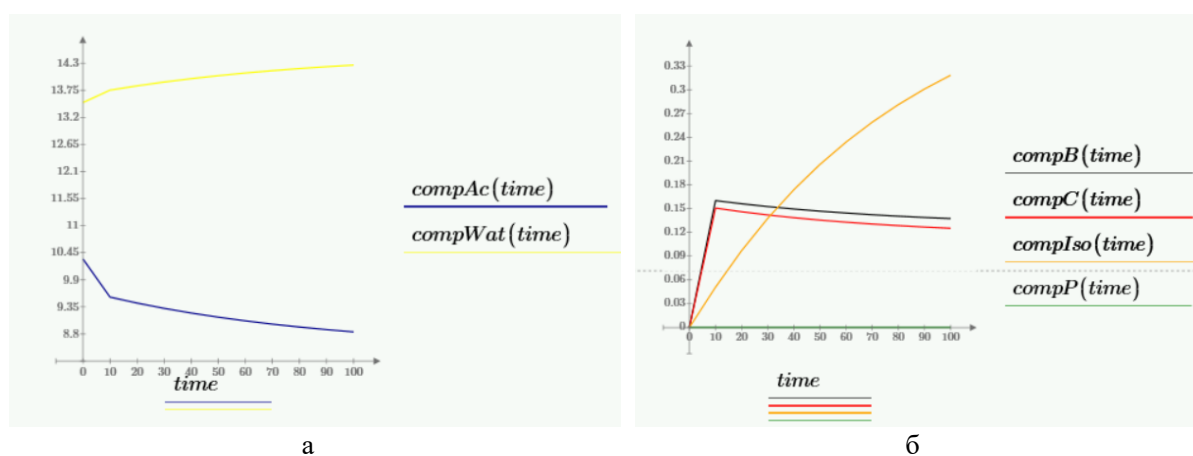


Рисунок 2 - Концентрационные зависимости реагентов для РИС: а – реагенты, б - продукты

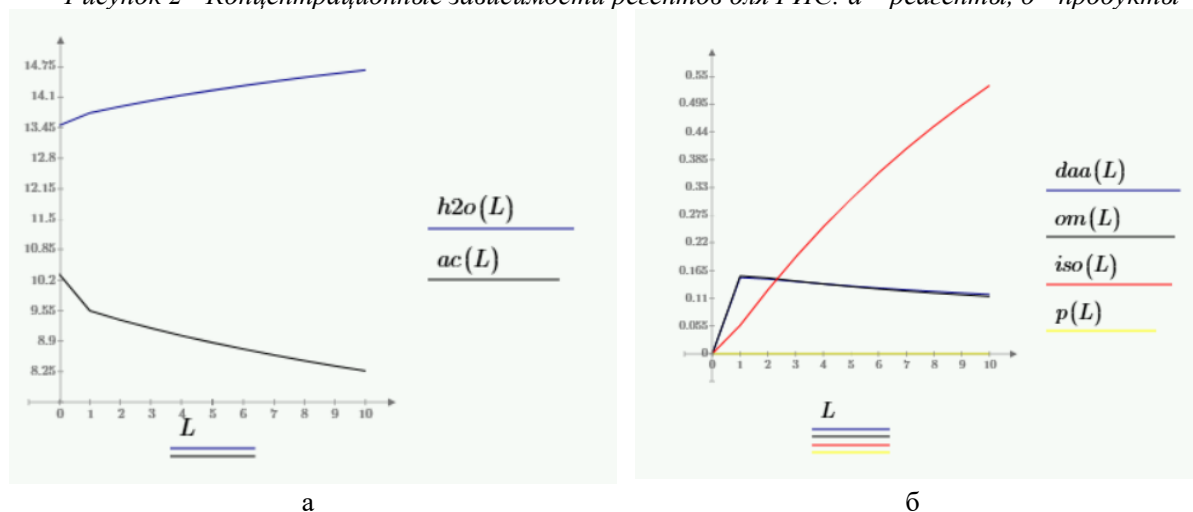


Рисунок 3 - Концентрационные зависимости реагентов для РИВ: а – реагенты, б - продукты

Также было проведена численная оптимизация процесса получения изофорона с целью термодинамического отсека различных продуктов. Для поставленных задач варьировали температуру в пределах от 165 до 185 градусов Цельсия, диаметр канала от 0.5 до 2 мм. и соотношения реагентов (ацетон:вода) от 1:0 до 1:1.15. Были подобраны следующие режимы (Таблица 1):

Таблица 1

Оптимизация режимов РИВ

Температура, °С	Соотношение (Ацетон:вода)	Диаметр канала, мм	Комментарий
185	1:1	0.5	Отсекается изофорон
175	1:1.075	1	Отсекается изофорон
185	1:0	1	Превалирует Мезитилоксид
185	1:0 (добавлено 0.134 моль/л диацетонного спирта)	1	Превалирует Мезитилоксид

Заключение

По результатам предложенной работы сформулирован механизм получения изофорона, предложены кинетические параметры реакции. В результате обработки полученных данных, предложены концентрационные зависимости реагентов и продуктов для различных гидродинамических профилей реакторов, а также разработаны режимы, позволяющие термодинамически отсекаать полупродукты и продукты реакции.

Список литературы

1. Tkachuk, A.I., Zagora, A.G., Terekhov, I.V. Isophorone Diamine — A Curing Agent for Epoxy Resins: Production, Application, Prospects. A Review. // Polym.Sci.Ser. 2022. V. 15. P. 171–176. DOI: 10.1134/S1995421222020289.
2. Ahmed M. I. Elkhaiary, Bartosz Rozmysłowicz, Jher Hau Yeap, Michael H. Studer, Jeremy S. Luterbacher. Kinetic Network Modeling of the Catalytic Upgrading of Biomass's Acetate Fraction to Aromatics. // Energy Fuels. 2023. V. 37. № 20. P. 16172–16180. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.3c02300.
3. Lin Chen, Ke Zheng, Yueguang Wang, Xiaorong Duan, Yushan Yang, Jingran Gao. Study of UV-cured tung oil-based polyalcohol resin with isophorone diisocyanate as crosslinker. // European Polymer Journal. 2024. V. 218. P. 113-118. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2024.113348.

УДК 663.681.3

Баландин Д.М., Горячий Н.В., Боровкова О.Ю.

Апробация мембранных процессов при глубокой переработке растительной сыворотки.

Баландин Денис Максимович – Инженер-технолог ОСЭ ЦТП, dbalandin98@yandex.ru

Горячий Николай Валерьевич – Начальник отдела ОСЭ ЦТП

Боровкова Ольга Юрьевна – Менеджер направления КС

АО «РМ Нанотех»,

Россия, Владимир, 600031, Добросельская улица, 224д.

В тезисах рассмотрена возможность применения мембранного разделения в процессе глубокой переработки растительной сыворотки.

Ключевые слова: мембранная технология, растительная сыворотка, крахмалосодержащее сырье, нутовая сыворотка

Approbation of membrane processes in deep processing of plant serum.

Balandin D.M., Goryachiy N.V., Borovkova O.Yu.

RM Nanotech JSC

The theses consider the possibility of using membrane separation in the process of deep processing of plant serum

Key words: membrane process, plant serum, starch-containing raw materials, chickpea whey.

Введение

В рамках глобального стремления к устойчивому развитию актуальной задачей становится максимальное использование ресурсов, включая побочные продукты пищевой промышленности. Одним из таких перспективных, но пока недооценённых ресурсов является сыворотка при переработке крахмалосодержащих продуктов.

К крахмалосодержащему сырью относятся: нут, горох, картофель, соя, подсолнечный жмых и др. Первой стадией переработки является процесс «вымывания» крахмала из предварительно измельченного сырья – экстракция [1]. В типовых технологиях переработки растительного сырья далее извлекается белок, для чего создается гидромодуль от 1:5 до 1:15. Осаждение белка осуществляется, как правило, неорганическими кислотами. В результате кислотного осаждения образуется растительная сыворотка в значительных объемах.

Возникает потребность в глубокой, экономически обоснованной утилизации сыворотки в процессе переработки крахмалосодержащего сырья. В состав растительной сыворотки, как правило, входят белки (альбумины и глобулины), углеводы (олигосахариды, моносахариды), минеральные вещества (фосфор, калий, магний и др.), а также витамины и пигменты. При попадании компонентов сыворотки в очистные сооружения существенно вырастает нагрузка, что ведет к снижению эффективности очистки. Все это может привести к тому, что неочищенные воды попадут в водоемы, вызвав экологическую проблему. В связи с этим возникает потребность в глубокой переработке побочного продукта и проектированию водооборотных схем для уменьшения объема потребляемой воды и сокращению сброса сточных вод.

Основная часть сыворотки (от 95%) – это вода, которую необходимо очистить в процессе переработки. Для концептуальной проработки проблемы были проведены пилотные испытания на реальном сырье. В рамках пилотных испытаний основной целью являлось:

- апробация методов нанофильтрации и обратного осмоса на рулонных фильтрующих элементах для получения воды из нутовой сыворотки.

При проведении работ решались следующие задачи:

- получение данных о производительности мембранных элементов нанофильтрации (серия SNNF) и обратного осмоса (серии SNRO и SNRO PP) при глубокой переработке нутовой сыворотки для последующего масштабирования процесса;
- получение первичной информации о необходимой программе химической промывки мембранных элементов при переработке нутовой сыворотки;
- получение образцов концентрата сыворотки для определения его свойств и анализа возможных рынков сбыта концентрат в жидкой и сухой форме;

- получение образцов пермеата и ретентата при нанофильтрации и обратного осмоса для их оценки по физико-химическим показателям для составления материального баланса крупнотоннажного производства.

Экспериментальная часть

Экспериментальная часть проводилась на пилотной установке МФСП-2х1М100РК производства АО «РМ Нанотех» (г.Владимир). Установка предназначена для концентрирования биохимических или пищевых жидкостей методом тангенциальной (проточной) фильтрации на полимерных мембранных элементах. В состав циркуляционного контура входят два, параллельно работающих, аппарата разделения для мембранных элементов типоразмера 3838, циркуляционный насос и соединительные коллекторы. Установка оснащена двумя теплообменниками типа «труба в трубе» для поддержания температуры процесса.

В результате кислотного гидролиза получают белки разных молекулярных масс, пептиды, отдельные аминокислоты в следствии неизбирательного воздействия кислот на сырье. Высокомолекулярные белки осаждаются вблизи изоэлектрической точки, а низкомолекулярные соединения, представленные низкомолекулярными белками, пептидами и аминокислотами, остаются в сыворотке. Глубина процесса гидролиза зависит от исходного сырья, температуры, величины pH. Исходя из этого, экономически не обосновано применение процесса концентрирования остаточного белка методом ультрафильтрации из-за малого содержания в сыворотке, отсутствия рынков сбыта растительного низкомолекулярного белка, а также понимания стабильной в течении года структуры и свойств остаточной белковой фракции.

В рамках испытаний была предложена двухстадийная схема переработки нутовой сыворотки с последовательным применением нанофильтрации и обратного осмоса при низкой температуре. Физико-химические анализы, проводимые при проведении испытаний:

1. Содержание азота, % масс.;
2. Содержание сухих веществ (СВ), % масс.;
3. Содержание углеводов, % масс.;
4. pH, ед. pH;
5. Содержание золы, % масс.

Состав исходной нутовой сыворотки:

1. Содержание сухих веществ – 2,9 %масс.;
2. Содержание азотосодержащих соединений – 0,08 % масс.;
3. Содержание углеводов – 2,5 % масс.;
4. Содержание золы – 0,3 % масс.

Для проведения концентрирования компонентов сыворотки были выбраны мембранные элементы в санитарном исполнении. Данные элементы разработаны для работы в специальных гигиенических условиях за счет отсутствия внешней стекловолоконной обмотки и застойных зон. Также, мембранные элементы данного исполнения имеют более высокую стойкость к высоким значениям pH и температуры, которые применяются при проведении химических промывок.

Для проведения пилотных испытаний были выбраны нанофильтрационные рулонные фильтрующие элементы Membranium SNNF 3838-31. Турбулизирующая сетка высотой 31 мм выбрана с учетом содержания высокомолекулярных веществ в исходном сырье и прогнозируемом фактором концентрирования.

Предварительно осветленная на фильтре 5 мкм нутовая сыворотка сгущалась в порционном режиме на пилотной установке. По мере концентрирования нутовой сыворотки отбирались пробы по двум линиям пермеата и общего ретентата. Параметры проведения процесса:

- Давление на входе в мембранный аппарат – 20 бар;
- Давление циркуляционной петли – 19,5 бар;
- Температура процесса – 10 °С;
- Поток в циркуляционной петле – 12,5 м³/час.

В ходе проведения процесса была получена зависимость (Рисунок 1) удельной производительности мембранных элементов от фактора концентрирования.



Рисунок 1 - Зависимость удельной производительности SNNF от фактора концентрирования.

Визуально, полученный пермеат не имел цвета, прозрачный, а ретентат имеет насыщенную желто-оранжевую окраску. Физико-химический анализ полученного пермеата и ретентата при факторе концентрирования - 11 представлен в Таблице 1.

Таблица 1

Физико-химические показатели полученного пермеата и ретентата нанофильтрации

Показатели	Пермеат первого корпуса	Пермеат второго корпуса	Ретентат
Сухие вещества, % масс.	0,6	0,6	17,2
Азотосодержащие компоненты, % масс.	<0,01	<0,01	0,11
Углеводы, % масс.	0,46	0,46	15,20
Зола, % масс.	0,077	0,103	1,540

Пермеат нанофильтрации направлялся на пилотную установку с мембранными элементами обратного осмоса серии SNRO 3838-31 и SNRO 3838-31 PP. Элементы располагались параллельно, работа на сырье осуществлялась в одинаковых условиях. В пищевой и перерабатывающей промышленности эти серии обратноосмотических элементов широко используются для задач по концентрированию растворов. В рамках пилотных испытаний исследовалась их производительность по фильтрации пермеата нанофильтрации нутовой сыворотки.

Параметры процесса:

- Давление на входе в мембранный аппарат – 20 бар;
- Давление циркуляционной петли – 19,5 бар;
- Температура процесса - 10°C;
- Поток в циркуляционной петле – 12 м³/час.

В ходе проведения эксперимента была также получена зависимость удельной производительности обратноосмотических мембранных элементов от фактора концентрирования (Рисунок №2).

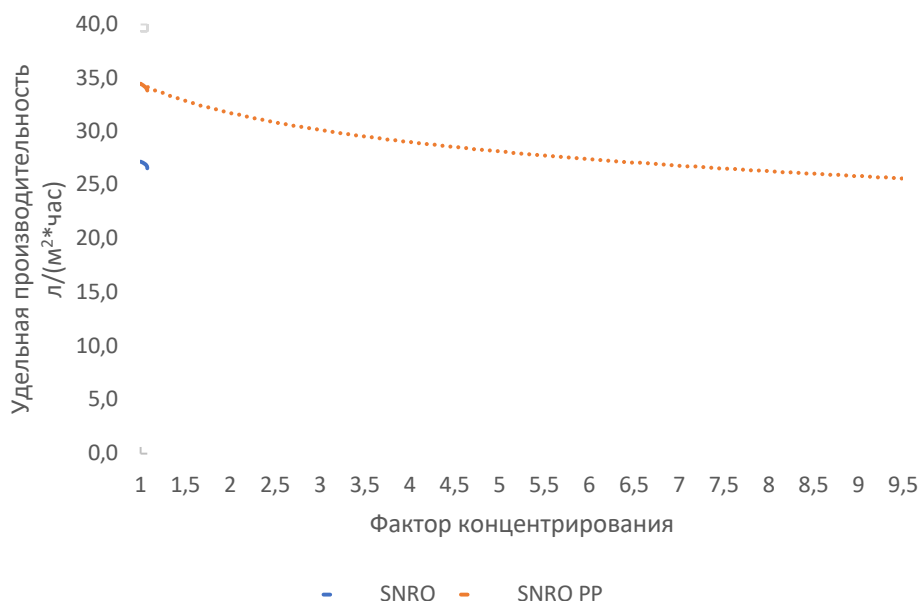


Рисунок 2 - Удельная производительность SNRO и SNRO PP.

Визуально, пермеат обратного осмоса бесцветный, прозрачный. В ретентате наблюдалась незначительная мутность и цветность желтоватого оттенка. Физико-химический анализ полученного пермеата и ретентата при факторе концентрирования - 9,5 представлен в Таблице 2.

Таблица 2

Физико-химические показатели полученного пермеата и ретентата обратного осмоса

Показатели	Пермеат		Ретентат
	SNRO 3838-31	SNRO 3838-31 PP	
Сухие вещества, % масс.	<0,1	<0,1	5,7
Азотосодержащие компоненты, % масс.	<0,01	<0,01	0,01
Углеводы, % масс.	<0,01	<0,01	4,37
Зола, % масс.	0,09	0,08	1,540

Для проведения промывок мембранных элементов нанофильтрации и обратного осмоса была выбрана типовая программа:

- Проведение первичного ополаскивания при температуре 25 °С;
- Щелочная мойка при температуре 50 °С на протяжении 30 минут (pH – 11);
- Промежуточное ополаскивание при температуре 25 °С;
- Кислотная мойка при температуре 50 °С (pH – 2);
- Финальное ополаскивание до прозрачности потоков.

Показателем эффективности химической промывки являлась водопроницаемости мембранного элемента до проведения процесса и после проведения промывки. Результаты мойки мембран приведены в Таблице 3.

Таблица 3

Водопроницаемость мембранных элементов до и после химмойки

Процесс До/после промывки	Нанофильтрация		Обратный осмос	
	До промывки	После промывки	До промывки	После промывки
Давление на входе в мембранный аппарат, бар	3		7	
Давление в циркуляционной петле, бар	2,4		6,5	
Температура, °С	25		21	
Удельная производительность элемента первого корпуса, л/(м ² ·час)	9,7	9,4	SNRO 3838-31	
			18,8	18,3
Удельная производительность элемента второго корпуса, л/(м ² ·час)	9,7	9,4	SNRO 3838-31 PP	
			23,6	23,2

Водопроницаемость после проведения химических промывок была восстановлена более чем на 98%. В результате проведения испытаний было переработано около 1000 л нутовой сыворотки, из которой получено 850 л воды, которую можно вернуть в производство.

Заключение

В результате проведенных пилотных испытаний:

1. Использование схемы «Нанофильтрация – Обратный осмос» позволяют получить воду требуемого качества для возврата ее в производство.
2. Предложенная схема химической промывки позволяет восстанавливать водопроницаемость мембранных элементов практически до начального значения;
3. В результате получены значения удельной производительности мембранных элементов для нанофильтрации и обратного осмоса, на основе которых можно проводить технико-экономический расчет систем по рециклу воды.

Список литературы

1. Kolpakova VV, Kulikov DS, Ulanova RV, Chumikina LV. Food and feed protein preparations from peas and chickpeas: Production, properties, application. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(2):333–348. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-333-348>.

УДК 621.593.001.24

Гаврикова Ю.А., Рудобашта С.П.

Мембранная дистилляция: инновационный подход к получению пресной воды в Крыму

Гаврикова Ю. А. – магистрант второго года обучения; julia-a-gavrikova@yandex.ru

Рудобашта С.П. – научный руководитель, д.т.н., профессор; rudobashta@mail.ru

РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева. Институт механики и энергетики им. В.П. Горячкина, кафедра «Электроснабжение и теплоэнергетика им. академика И.А. Будзко», Москва, 127550, Тимирязевская улица, 49.

В последние годы проблема нехватки пресной воды становится все более актуальной, особенно в таких регионах, как Крым. С учетом географических и климатических особенностей полуострова, поиск эффективных методов опреснения и очистки воды является приоритетной задачей. Одним из перспективных технологий, способствующих решению данной проблемы, является мембранная дистилляция.

Ключевые слова: мембранная дистилляция, Крым, пресная вода, климат.

Membrane distillation: an innovative approach to obtaining fresh water in crimea

Gavrikova Y.A., Rudobashta S.P.

Gavrikova Yulia Aleksandrovna, second-year student of the Master's degree program at the Institute of Mechanics and Power Engineering named after V.P. Goryachkin, Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, julia-a-gavrikova@yandex.ru

Scientific advisor – Rudobashta Stanislav Pavlovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, Department of Electricity Supply and Thermal Power Engineering named after Academician I.A. Budzko, rudobashta@mail.ru

Annotation. In recent years, the issue of freshwater scarcity has become increasingly pressing, especially in regions such as Crimea. Given the geographical and climatic characteristics of the peninsula, finding efficient methods for water desalination and purification is a priority. One of the promising technologies that can help address this problem is membrane distillation.

Keywords: membrane distillation, Crimea, freshwater, climate.

Мембранная дистилляция – это современный процесс, который находит все большее применение в области опреснения и очистки воды. Этот метод особенно актуален для регионов, где наблюдается нехватка пресной воды, таких как Крым. В данной статье мы рассмотрим принципы работы мембранной дистилляции, ее преимущества и перспективы использования в Крыму [2].

Существует несколько типов мембранной дистилляции (рис. 1)

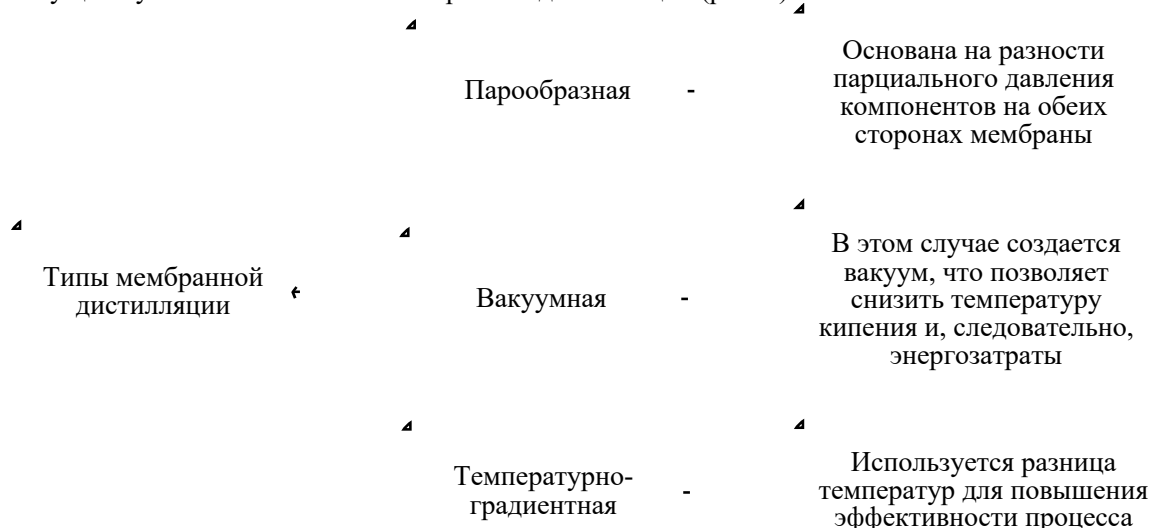


Рисунок 1 – Типы мембранной дистилляции

В основе мембранной дистилляции лежит применение гидрофобных мембран с полупроницаемой структурой, способных разделять жидкости благодаря различиям в их физических характеристиках. В процессе мембранной дистилляции происходит испарение воды на горячей стороне мембраны, после чего пар проходит через мембрану и конденсируется на другой холодной ее стороне. Этот метод может использоваться для опреснения морской воды или очистки сточных вод, превращая их в пресную воду. Острый дефицит пресной воды рассматриваем в южных регионах России, прилегающих к Черному, Азовскому и Каспийскому морям [1]. Согласно данным Министерства экологии и природных ресурсов Республики Крым, дефицит пресной воды в регионе достигает 50% от общей потребности, что негативно сказывается на сельском хозяйстве, туризме и качестве жизни населения. С учетом географических и климатических особенностей полуострова, поиск эффективных методов опреснения и очистки воды является приоритетной задачей

Процесс мембранной дистилляции включает в себя несколько ключевых этапов (рис. 2).

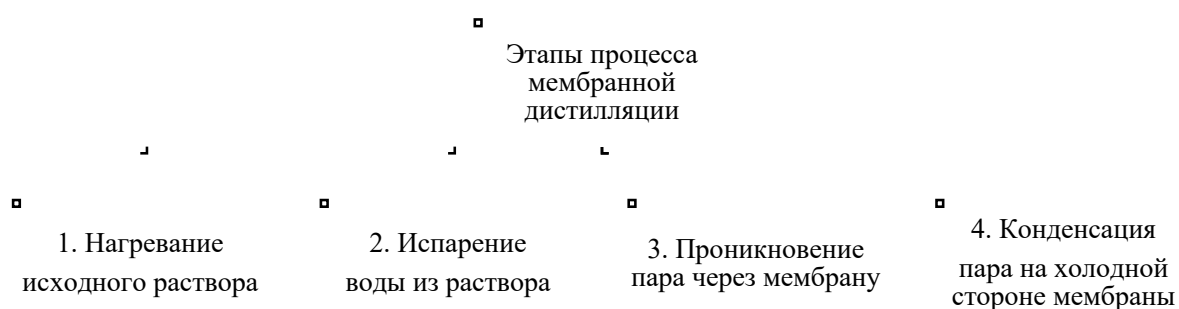


Рисунок 2 – Этапы процесса мембранной дистилляции

1. Нагревание: исходная жидкость (например, морская или загрязненная вода) подогревается до определенной температуры.
2. Испарение: при этом происходит испарение растворителя (воды) с образованием паров.
3. Проникновение через мембрану: пары растворителя проходят через мембрану, оставляя за собой соли и другие загрязняющие вещества.
4. Конденсация: на другой стороне мембраны пары конденсируются, образуя чистую дистиллированную воду.

Мембранная дистилляция обладает рядом преимуществ, которые делают ее привлекательной для использования в Крыму:

1. Низкие энергозатраты: в отличие от традиционных методов опреснения, таких как обратный осмос или многократная дистилляция, мембранная дистилляция требует значительно меньше энергии. Это особенно важно для регионов с ограниченными энергетическими ресурсами.
2. Экологичность: мембранная дистилляция не требует использования химических реагентов, что минимизирует воздействие на окружающую среду. Это делает ее более безопасной для экосистемы Крыма.
3. Гибкость: мембранная дистилляция может быть адаптирована для работы с различными источниками воды, включая морскую, солоноватую и сточные воды. Это открывает новые возможности для получения пресной воды в условиях Крыма.
4. Высокая эффективность: современные мембраны обладают высокой селективностью, что позволяет достигать высоких уровней очистки при опреснении воды.

Мембранная дистилляция обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами опреснения:

- Энергоэффективность: процесс требует значительно меньше энергии, что делает его более экономически выгодным, особенно в условиях ограниченных энергетических ресурсов.
- Низкие затраты на оборудование: мембранные установки проще и дешевле в производстве и эксплуатации, чем традиционные дистилляционные установки.
- Устойчивость к загрязнениям: мембраны могут эффективно удалять соли и другие загрязнения, что делает процесс более универсальным.

Крым, испытывающий острый дефицит водных ресурсов, сталкивается с серьезными вызовами в обеспечении населения пресной водой. Внедрение мембранной дистилляции может стать важным шагом на пути к созданию устойчивой системы водоснабжения в регионе.

С учетом климатических условий Крыма, где летние температуры могут достигать высоких значений, использование солнечной энергии для нагрева воды перед мембранной дистилляцией представляется особенно перспективным. Это позволит значительно снизить затраты на электроэнергию и сделать процесс более экономически выгодным [3].

Технология мембранного разделения может стать решением этой проблемы, позволяя получать пресную воду из морской или сточной воды, а для получения из морской воды в крупном промышленном масштабе используют метод дистилляции (выпаривания), который характеризуется большими энергозатратами [1]. В Крыму уже существуют пилотные проекты по использованию мембранной дистилляции для опреснения морской воды. Например, в 2022 году в городе Севастополь была запущена экспериментальная установка, которая показала высокую эффективность в условиях местного климата. Установка способна производить до 1000 литров пресной воды в сутки, что достаточно для обеспечения небольшого поселка.

Кроме того, мембранная дистилляция может быть интегрирована в существующие системы водоснабжения и очистки, что позволит улучшить качество воды и обеспечить доступ к пресной воде для населения и сельского хозяйства.

В условиях растущего спроса на пресную воду мембранная дистилляция может стать ключевым элементом системы водоснабжения Крыма. Активные исследования и разработки в этой области способствуют появлению новых, более совершенных мембранных материалов и технологий, что повышает эффективность метода.

Кроме того, мембранная дистилляция может быть интегрирована с другими методами очистки и опреснения воды, что позволит создать комплексные системы, обеспечивающие устойчивое водоснабжение.

Заключение

Мембранная дистилляция — это современная и высокоэффективная технология получения пресной воды, способная значительно улучшить ситуацию с водоснабжением в Крыму. Учитывая растущий дефицит водных ресурсов, этот метод может стать важным инструментом для преодоления водного кризиса в регионе.

Инвестиции в технологии мембранной дистилляции и их внедрение в Крыму могут привести к созданию устойчивой и экологически чистой системы водоснабжения, что, безусловно, положительно скажется на жизни местного населения и экосистеме региона. Энергоэффективность, низкие затраты и высокая эффективность делают эту технологию перспективной для применения в условиях ограниченных ресурсов. Для успешного внедрения мембранной дистилляции в Крыму необходима государственная поддержка, включая финансирование пилотных проектов и создание благоприятных условий для инвестиций в новые технологии. Кроме того, важно развивать научные исследования в этой области, чтобы совершенствовать мембранные материалы и повышать эффективность процесса.

Список литературы

1. Гаврикова, Ю. А. Опреснение морской воды в малых хозяйствах России, находящихся на побережье черного и Каспийского морей / Ю. А. Гаврикова // Чтения академика В. Н. Болтинского : Сборник статей научно-практической конференции, посвященный 90-летию Шарова Николая Михайловича, Москва, 23–24 октября 2024 года. – Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2024. – С. 458-462. – EDN ODSCUN.
2. Рудобашта С.П., Махмуд С. Ю. Экспериментальное исследование процесса мембранной дистилляции при опреснении морской воды // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2010. Том 53. Вып. 1. С. 108-112.
3. Рудобашта С.П., Махмуд С. Ю. Опреснение морской воды энергосберегающим методом мембранной дистилляции // Промышленная теплотехника. 2003. Т. 25. № 6. С. 75-83.

УДК 66.081.6-278

Грудковская В.К., Грушевенко Е.А., Сафронов П.А., Петрова И.В., Баженов С.Д.
Влияние предварительной фильтрации промышленного алканоламинового абсорбента на эффективность их электромембранной регенерации

Грудковская Валентина Константиновна – студент; 203761@muctr.ru.

Грушевенко Евгения Александровна – к.х.н., с.н.с;

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В.Топчиева Российской академии наук, Россия, Москва, 119991, Ленинский проспект, 29.

Традиционной технологией выделения кислых газов является абсорбция водными растворами алканоламинов. При длительной эксплуатации абсорбентов наблюдается термоокислительная деструкция. Продукты деградации термостабильны и имеют ионную природу. Их накопление приводит к существенным эксплуатационным проблемам. Одним из перспективных подходов к регенерации алканоламиновых абсорбентов является комбинация мембранной фильтрации и электродиализа. В данной работе в качестве исследуемых водных растворов алканоламинов были взяты реальные промышленные абсорбенты, бывшие в эксплуатации на блоках улавливания кислых газов в составе различных технологических установок. Впервые проведено исследование влияния размера пор мембраны предварительной фильтрации алканоламинового абсорбента на эффективность электродиализного выделения термостабильных солей. Продемонстрировано, что снижение размера пор от микрофильтрационной до ультрафильтрационной мембраны позволяет увеличить степень извлечения термостабильных солей 55% до 60% в случае классического электродиализа и до 87% в случае биполярного электродиализа.

Ключевые слова: электродиализ, алканоламиновые абсорбенты, регенерация абсорбентов, термостабильные соли, мембранная фильтрация.

Effect of Pre-filtration of Industrial Alkanolamine Absorbent on the Efficiency of their Electromembrane Regeneration

Grudkovskaya V. K.¹, Grushevenko E. A.¹, Safronov P. A.¹, Petrova I. V.¹, and Bazhenov S. D.¹

¹ A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, Moscow, 119991, Leninsky Prospect, 29.

Traditional technology of acid gas extraction is absorption by aqueous solutions of alkanolamines. Thermal-oxidative destruction is observed during long-term operation of absorbents. Degradation products are thermally stable and have an ionic nature. Their accumulation leads to significant operational problems. One of the promising approaches to the regeneration of alkanolamine absorbents is a combination of membrane filtration and electrodialysis. In this work, real industrial absorbents used in acid gas collection units in various process plants were taken as the studied aqueous solutions of alkanolamines. For the first time, a study was conducted on the effect of the pore size of the pre-filtration membrane of the alkanolamine absorbent on the efficiency of electrodialysis extraction of thermally stable salts. It was demonstrated that decreasing the pore size from the microfiltration to the ultrafiltration membrane allows increasing the degree of extraction of thermally stable salts from 55% to 60% in the case of classical electrodialysis and up to 87% in the case of bipolar electrodialysis.

Key words: electrodialysis, alkanolamine absorbents, absorbent regeneration, heat-stable salts, membrane filtration.

Введение

Проблема извлечения кислых газов (CO₂, H₂S, и др.) из технологических газовых потоков традиционно актуальна для задач нефтегазового комплекса [1]. Данная проблема решается абсорбцией кислых компонентов алканоламиновыми абсорбентами (т.н. аминная очистка). Повсеместное распространение в качестве абсорбентов в данной технологии получили первичные амины – моноэтаноламин (МЭА), 2-амино-2-метил-1-пропанол (АМП), вторичные – диэтаноламин (ДЭА), диизопропаноламин (ДИПА), третичные – триэтаноламин (ТЭА), метилдиэтаноламин (МДЭА).

Процесс десорбции кислых газов из абсорбента проводят при температурах от 100 до 140°C в зависимости от типа амина. Такие температурные режимы являются причиной термической деградации алканоламинов [2], а в присутствии в газовых потоках кислорода приводят к интенсификации термоокислительной деструкции [3]. В результате образуются соединения

ионогенной (продукты взаимодействия ионов протонированного алканоламмония и анионов органических и неорганических кислот – т.н. термостабильные соли (ТСС)) и неионогенной природы (смолистые образования, продукты олигомеризации амина) [4]. Накопление продуктов деградации в абсорбенте способствует возрастанию скорости коррозии оборудования, эрозии теплообменников и трубопроводов, приводит к снижению сорбционной емкости абсорбента по целевым компонентам, изменению его физико-химических свойств и, связанного с этим, эффекта пенообразования в колоннах [5, 6]. Перспективным методом регенерации алканоламиновых абсорбентов от ионогенных продуктов деструкции является электродиализ [7].

Тем не менее, электромембранный метод не позволяет удалять из абсорбентов незаряженные продукты деградации. Кроме того, обнаружено, что при длительном контакте с промышленными абсорбентами высокой степени деградации снижается эффективность электродиализного переноса ТСС из растворов из-за засорения поверхности ионообменных мембран [8-10].

Экспериментальная часть

Материалы

В качестве исследуемых водных растворов алканоламинов были взяты реальные промышленные абсорбенты: 18 % мас. водный раствор МЭА, 54 % мас. водный раствор МДЭА, 23 % мас. водный раствор ДЭА, 39 % мас. водный раствор МДЭА и 24 % мас. водный раствор МЭА.

Предварительную фильтрацию абсорбционных растворов проводили через коммерческие фильтрационные мембраны: микрофильтрационная МФФК-1 (ЗАО «НТЦ Владипор») и ультрафильтрационная УФФК (ЗАО «НТЦ Владипор»). (vladipor.ru).

Для проведения электродиализа применяли гетерогенные ионообменные мембраны производства ООО «ИП Шекиноазот». (n-azot.ru).

Анализ степени деградации алканоламинового абсорбента

Расчет содержания механических примесей (X) проводили по формуле (1) после 3-х параллельных измерений:

$$X = \frac{(a - b) \cdot 1000 \cdot 1000}{y}, \frac{\text{мг}}{\text{л}}, \quad (1)$$

где, a - масса бюкса с фильтром и осадком, г,

b - масса бюкса с чистым фильтром, г,

y - объем пробы, взятой на анализ (100 см³).

Удельная электропроводность (УЭП) является маркером ионной загрузки абсорбента. Общее содержание ТСС в абсорбенте определяется путем перевода всех термостабильных солей в кислоты и титрования этих кислот сильным основанием. Метод позволяет определить сумму всех анионов (в виде связанного солями амина), образующих нелетучие кислоты в водном растворе с низким pH, а также рассчитать общую концентрацию анионов термостабильных солей (ТСС) в абсорбенте путем сложения результатов обнаруженных эквивалентов сильных и слабых кислот и вычитания вклада любой кислоты, добавленной при титровании образца.

Общее суммарное содержание ТСС (мэкв/г) определяется по формуле (2) как среднее из трех параллельных измерений:

$$\text{ТСС} = \frac{[(NN * H) - (NH * E)]}{C}, \quad (2)$$

где, NN = нормальность NaOH,

NH = нормальность HCl,

H = Конечная точка титрования, связанный Амин, мл,

E = добавленная HCl, мл; C = масса образца, г.

Фильтрация абсорбционного раствора

Предварительная фильтрация абсорбционных растворах осуществлялась на проточной фильтрационной установке. (рис. 1). Фильтрацию каждого раствора проводили 3хкратно на каждом типе фильтра. Активная площадь поверхности фильтрующей мембраны составляла 28 см². Фильтрацию проводили при следующих условиях: температура фильтруемого раствора составила 20°C, объем фильтруемого раствора 0.5 кг, избыточное давление над мембраной зависело от типа фильтра и составило для микрофильтра – 2.5-3.0 атм, для ультрафильтра – 5.0-10.0 атм.

Содержание осадка смолистых и взвешенных веществ на фильтре рассчитывали по формуле (3) на основании трех параллельных измерений:

$$Y = \frac{(a - b)}{y}, \frac{\text{мг}}{\text{кг}}, \quad (3)$$

где, a - масса бюкса с фильтром и осадком, г,

b - масса бюкса с чистым фильтром, мг,

y - масса фильтрата (кг).

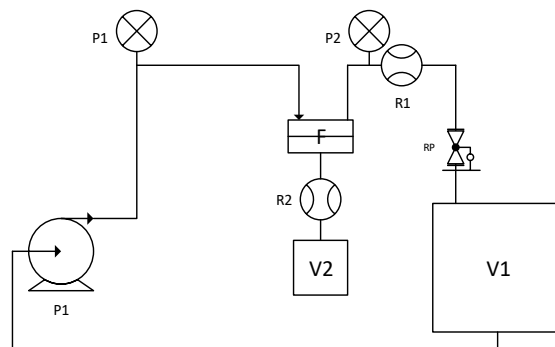


Рисунок 1 - Схема фильтрационной установки. V1 – емкость с фильтруемым абсорбентом, V2 – емкость с фильтром, F- фильтрационная ячейка, P1 – мембранно-плунжерный насос, P1, P2 – манометры, R1, R2 – расходомеры, RP – регулятор давления до себя.

Электродиализ

Электродиализ проводили в двух конфигурациях: классический электродиализ (ЭД) – ЭД модуль составлен из чередующихся анионообменных мембран МА-41 и катионообменных мембран МК-40 и биполярный электродиализ (БЭД) - ЭД модуль составлен из чередующихся анионообменных мембран МА-41 и биполярных мембран МБ-2. (рис. 2). Одноименные камеры аппарата соединены гидравлически, т.е. имеют общий распределительный коллектор. Электродиализ проводили в потенциостатическом режиме путем подачи на электродиализатор постоянного напряжения 30 В.

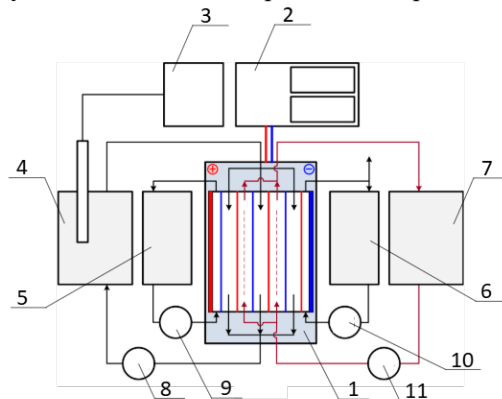


Рисунок 2 - Схема лабораторной электромембранной установки обработки деградированных растворов алканоламиновых абсорбентов, где 1 – электромембранная ячейка; 2 – блок питания с индикацией напряжения (U) и тока (I) в системе; 3 – многофункциональный прибор для измерения удельной объемной электропроводности и температуры раствора; 4 – емкость очищаемого раствора (дилюата); 5 – емкость раствора прианодной камеры (анолита); 6 – емкость раствора прикатодной камеры (католита); 7 - емкость концентрата (рассола); 8 – насос прокачки тракта дилюата; 9 – насос прокачки тракта католита; 10 – насос прокачки тракта анолита; 11 – насос прокачки тракта концентрата.

Сравнительный анализ эффективности процессов электродиализной обработки алканоламиновых абсорбентов рассчитывали по формуле (4):

$$E = \frac{C_{\text{ТСС}}^0 - C_{\text{ТСС}}^{60}}{C_{\text{ТСС}}^0} \cdot 100\%, \quad (4)$$

Результаты

Влияние предварительной фильтрации на эффективность электромембранной регенерации промышленных алканоламиновых абсорбентов

Подача нефильтрованного раствора напрямую в электродиализатор приводит к стремительному засорению ионообменных мембран. Влияние типа (микро-, ультрафильтрационных) мембран предварительной фильтрации промышленных абсорбционных растворов на основе МЭА, ДЭА и МДЭА на эффективность процесса электродиализного выделения ТСС (Таблица 1).

Таблица 1

Содержание механических примесей и образование осадка смолистых и взвешенных веществ (г) на фильтрах МФФК-1 и УФФК после фильтрации раствора алканоламинового абсорбента (кг).

Абсорбент	Содержание примесей, мг/кг	Образование осадка на фильтре, мг/кг		Содержание смолистых веществ и взвешенных частиц, мг/кг	
		МФФК-1	УФФК	МФФК-1	УФФК
МДЭА 54% мас.	300±5	615±5	670±5	315±5	370±5
ДЭА 23% мас.	115±3	200±3	245±3	85±3	130±5
МДЭА 39 % мас.	70±3	150±3	170±3	80±3	100±5
МЭА 18% мас.	85±5	175±5	260±5	90±5	170±5
МЭА 24% мас.	155±5	340±5	430±5	185±5	275±5

Наличие частиц размером от 500 нм до 270 нм (фильтрация на УФФК) в растворе алканоламиновых абсорбентов может приводить к постепенному росту сопротивления электродиализного аппарата и снижению выхода ТСС по току. В этой связи предварительная фильтрация растворов оказывает значимое влияние на эффективность дальнейшего процесса электродиализной регенерации абсорбента.

Результаты электродиализной обработки (классический и биполярный вариант) предварительно фильтрованных алканоламиновых абсорбентов (МДЭА, ДЭА, МЭА). (Таблица 2).

Таблица 2

Показатели электродиализной обработки алканоламиновых абсорбентов.

Абсорбент	Тип мембран	Фильтр	Исходная концентрация ТСС, % мас.	Концентрация через 120 минут обработки, % мас.		Степень извлечения ТСС, %
				Амин в К	ТСС в Д	
МДЭА 54% мас.	МК-40 МА-41	—	12.8	15	7.7	40
	МК-40 МА-41	МФФК-1	12.8	11	5.8	55
	МК-40 МА-41	УФФК	12.8	10	5.1	60
	МК-40 МА-41	НаРМ	12.8	9	4.5	65
	МБ-2 МА-41	УФФК	12.8	1.5	1.7	87
ДЭА 23% мас.	МБ-2 МА-41	УФФК	13.9	2.1	2.1	85
МЭА 24% мас.	МБ-2 МА-41	УФФК	5.8	3.0	1.3	77

Комбинация биполярного электродиализа и предварительной фильтрации позволяет дополнительно увеличить степень извлечения ТСС, а также снизить потери абсорбента в концентрат. Снижение потерь абсорбента связано с отсутствием переноса алканолamina через катиообменную мембрану в виде ТСС, поскольку в случае биполярного электродиализа образование противоионов в камерах обессоливания и концентрирования обеспечивается за счет диссоциации воды.

Заключение

Впервые проведено исследование влияния размера пор мембраны предварительной фильтрации алканолaminового абсорбента на эффективность электродиализного выделения ТСС. Установлено, что в зависимости от типа алканолamina (МЭА, ДЭА, МДЭА) варьируется как исходное содержание ТСС, так и достигаемая степень извлечения. Это связано с различным механизмом смолообразования в растворах абсорбентов в зависимости от типа алканолamina. Продemonстрировано, что снижение размера пор от микрофильтрационной до ультрафильтрационной мембраны позволяет увеличить степень извлечения ТСС 55% до 60% в случае классического электродиализа и до 87% в случае биполярного электродиализа.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНХС РАН (Извлечение и утилизация диоксида углерода).

Список литературы

1. Прогноз развития энергетики мира и России 2024 / под ред. Макарова А.А., Кулагина В.А., Грушевенко Д.А, Галкиной А.А.; ИНЭИ РАН Москва, 2024. 207 с.
2. Azarpour A., Zendeboudi S. Hybrid Smart Strategies to Predict Amine Thermal Degradation in Industrial CO₂ Capture Processes. // ACS omega. 2023. V. 8. P. 26850. DOI: 10.1021/acsomega.3c01475.
3. Ochedi F. O., Andresen J., Van der Spek M. Oxidative degradation of glycine in aqueous KOH/K₂CO₃ solutions for CO₂ capture. // Greenhouse Gases: Science and Technology. 2024. V. 14. P. 1025. DOI: 10.1002/ghg.2310.
4. Gouedard C., Picq D., Launay F., Carrette P.L. Amine degradation in CO₂ capture. I. A review. // International Journal of Greenhouse Gas Control. 2012. V 10. P.244. DOI: 10.1016/j.ijggc.2012.06.015.
5. Баженов С.Д., Новицкий Э.Г., Василевский В.П., Грушевенко Е.А., Биенко А.А., Волков А.В. Термостабильные соли и методы их выделения из алканолaminовых абсорбентов диоксида углерода. // Журнал Прикладной Химии. 2018.Т. 91. №4. С. 533. DOI: 10.1134/S0044461819080024.
6. Dumée L., Scholes C., Stevens G., Kentish S. Purification of aqueous amine solvents used in post combustion CO₂ capture: A review. // International Journal of Greenhouse Gas Control. 2012. V. 10. P. 443455. DOI: 10.1016/j.ijggc.2012.07.005.
7. Новицкий Э.Г., Василевский В.П., Баженов С.Д., Грушевенко Е.А., Васильева В.И., Волков А.В. Влияние состава растворов секций концентрирования на эффективность выделения диоксида углерода из водного раствора моноэтаноламина методом электродиализа. // Мембраны и мембранные технологии. 2014. Т. 4. С. 280. DOI: 10.1134/S0965544114080118.
8. Bazhenov S., Rieder A., Schallert B., Vasilevsky V., Unterberger S., Grushevenko E, Volkov V., Volkov A. Reclaiming of degraded MEA solutions by electrodialysis: Results of ED pilot campaign at post-combustion CO₂ capture pilot plant. International Journal of Greenhouse Gas Control. 2015. V. 42. P. 593601. DOI: 10.1016/j.ijggc.2015.09.015.
9. Chen F., Chi Y., Zhang M., Yang K., Fu C. Removal of heat stable salts from N-methyldiethanolamine wastewater using electrodialysis: A pilot-scale study// Desalination Water Treat. 2020. V. 195. P. 4857. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.116777.
10. Wang T., Hovland J., Jens K.J. Amine reclaiming technologies in post-combustion carbon dioxide capture // Journal of Environmental Sciences. 2015. V. 27. P. 276. DOI: 10.1016/j.jes.2014.06.037.

УДК 697.94

Елагина А.А., Фарносова Е.Н.

Современные проблемы состояния атмосферного воздуха в промышленных городах РФ и способ их решения.

Елагина Алина Александровна – аспирант 1 курса, elagina-aa@tion.ru.

Фарносова Елена Николаевна – к.т.н., доцент кафедры ПАХТ;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В тезисах рассмотрены актуальные вопросы качества атмосферного воздуха в промышленных центрах. Оценено влияние загрязняющих веществ на здоровье населения. Выбрано устройство и предложен способ модификации сорбционных фильтров для очистки приточного воздуха.

Ключевые слова: атмосферный воздух, Федеральный проект «Чистый воздух», онлайн-мониторинг, здоровье населения, стенд для тестирования сорбентов, адсорбция, бризер.

Modern problems of atmospheric air condition in industrial cities of the Russian Federation and ways to solve them.

Elagina A.A., Farnosova E.N.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The air pollution in industrial centers has been analyzed. The impact of contaminants on public health has been judged. The optimal device for indoor air purification has been chosen. The way of adsorption filters modification for increasing of its efficiency has been proposed.

Key words: atmospheric air, Federal Clean Air Project, online monitoring, public health, sorbent testing stand, adsorption, breather.

Введение

Промышленные города часто сталкиваются с повышенным уровнем загрязнения воздуха, воды и почвы. Это может вызывать заболевания дыхательной системы, сердечно-сосудистые проблемы, аллергии и даже онкологические заболевания. Существующие на рынке приборы очистки и подачи воздуха в помещения имеют малую эффективность по токсичным веществам, характерным для этих регионов.

Цель исследования

Оценить экологическое состояние атмосферного воздуха в крупных промышленных городах РФ, выбрать типичные токсические компоненты и оценить их влияние на организм человека. Оценить доступные на рынке приборы очистки воздуха в жилых помещениях. Определить их достоинства и недостатки. Предложить вариант модификации систем с целью увеличения их эффективности и емкости по маркерным компонентам.

Методы и материалы

Для оценки качества состояния воздуха использованы данные из государственного доклада, открытых данных онлайн-мониторинга воздуха и публикации медицинских статей. Для удаления загрязняющих компонентов из воздуха с превышениями ПДКм.р. в 5-10 раз были подобраны сорбционные материалы, потенциально подходящие для использования в системах очистки приточного воздуха: ионообменные волокнистые материалы, активные и импрегнированные угли, цеолиты. Для определения полной и динамической емкости сорбентов разработан стенд, состоящий из блоков: подготовки нулевого газа, подачи целевого компонента, увлажнения, подготовки хладагента и тестовой камеры.

Результаты и их обсуждение

Основные источники загрязнения воздуха включают промышленные выбросы (металлургические, химические, нефтеперерабатывающие и др.) [1], автомобильные выхлопы, сельскохозяйственная деятельность (использование пестицидов и удобрений) и также бытовые источники – испарения от чистящих средств, строительный материалов, курения. Эти источники загрязнения насыщают атмосферу частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$, оксидами азота, серы, летучими органическими соединениями, создавая риски для здоровья людей.

Однако, помимо видимых угроз существует и скрытая опасность – накопление токсичных веществ в организме человека. Долгосрочное воздействие вредных соединений, нарушает работу иммунной и эндокринной систем, повышает риск хронических заболеваний. Согласно

государственному докладу 2 негативная химическая нагрузка оказывает влияние на 51,6% населения РФ.

За последние 10 лет отмечено снижение доли проб атмосферного воздуха с превышением ПДК по приоритетным загрязняющим веществам. Однако, это не свидетельствует об улучшении экологической обстановки.

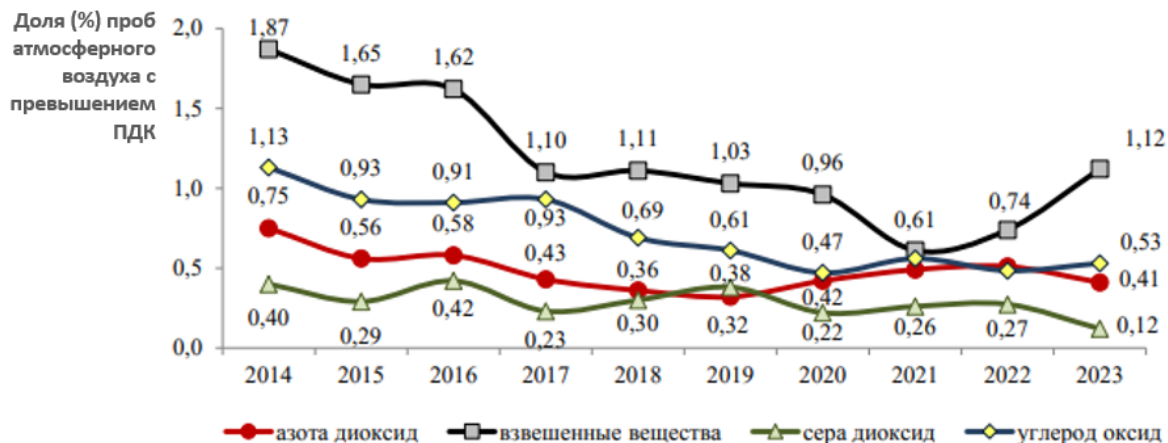


Рисунок 1- Изменение доли проб атмосферного воздуха приоритетных загрязняющих веществ с превышением ПДК [1].

В отношении приоритетных загрязняющих веществ наблюдалось снижение доли проб атмосферного воздуха, не соответствующих санитарно-гигиеническим требованиям по содержанию азота диоксид – на 45,3 %, взвешенных веществ – на 40,1 %, серы диоксида – на 70,0 % и углерода оксида – на 53,1 % (рис. 1).

Для решения экологических проблем разработан Национальный проект «Экология», включающий в себя Федеральные проекты, такие как: «Чистый воздух», «Чистая вода», «Инфраструктура для обращения с отходами I-II классов опасности» и др.

Федеральный проект «Чистый воздух» ориентирован на поэтапное снижение выбросов опасных загрязняющих веществ в городах-участниках за счет модернизации промышленных предприятий, экологизации коммунальной и транспортной инфраструктуры. Участниками проекта являются крупные промышленные города, такие как: Братск, Красноярск, Липецк, Магнитогорск, Медногорск, Нижний Тагил и др. Согласно проекту, планируется снизить выбросы вредных веществ на 20% к 2030 году (относительно выбросов в атмосферу на 2020 год).

Работа проекта активно ведется, однако, снижение выбросов на 20% не означает, что будут устранены превышения по нормам выбросов, т.к. в некоторых промышленных городах экологическая обстановка остается тяжелой.

В зависимости от промышленной направленности города и его географического расположения качество воздуха может сильно отличаться.

При анализе уровня загрязнения атмосферного воздуха на территории федеральных округов можно отметить, что 20 из 34 экологически неблагоприятных городов находятся в Сибирском федеральном округе [7]. Это объясняется выбросами крупных предприятий (например, такие как ПАО «ГМК«Норильский никель», АО «РУСАЛ Красноярск», ООО «ЕВРАЗ» и др.), также низкой рассеивающей способностью атмосферы в азиатской части страны (поселения Урала, Сибири и Дальнего Востока), что ведет накоплению неблагоприятных компонентов в атмосферном воздухе. Данные утверждения ярко иллюстрируются онлайн-картами [4].

В промышленных городах некоторые компоненты атмосферного воздуха превышают показатели ПДК либо же находятся в постоянном фоновом присутствии. Например, в городе Челябинск отмечено постоянное фоновое присутствие аммиака и диоксида серы ниже уровня ПДК_{с.с.} (рис.2). Превышения были зафиксированы по диоксиду азота, сероводороду, РМ₁₀ и РМ_{2,5}. Концентрации веществ на диаграммах (рис.2) указаны в мг/м³.

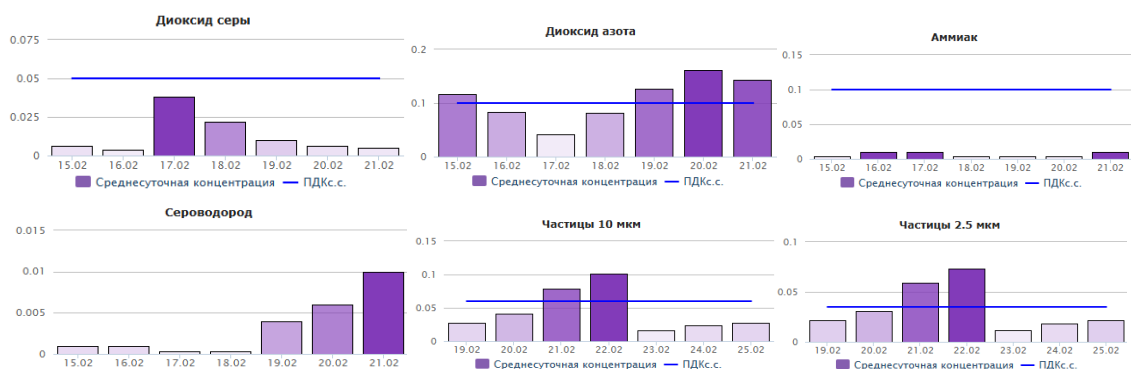


Рисунок 2 - Данные онлайн-мониторинга в г. Челябинск, 19.02.2025-25.02.2025гг.

В таблице 1 приведены нормы ПДК_{с.с.} по выбранным маркерным компонентам.

Таблица 1

Нормы ПДК_{с.с.} для выбранных маркерных компонентов

Маркерный компонент	Норма ПДК _{с.с.} , мг/м ³
Диоксид серы	0,05
Диоксид азота	0,04
Аммиак	0,1
Сероводород	0,008
Частицы 10 мкм (PM ₁₀)	0,06
Частицы 2,5 мкм (PM _{2,5})	0,035

Согласно данным наблюдений в 2023 году (Таблица 2) в Московской области высокая степень загрязнения атмосферного воздуха сложилась в Москве, Мытищах, Подольске и Серпухове, повышенная – в Коломне, в остальных городах Московской области (Воскресенске, Дзержинском, Клину, Щелкове и Электростали) – низкая [6].

Таблица 2

Превышения по компонентам в городах Московской области [6].

Город	Население, тыс. человек	Приоритетные загрязняющие вещества	СИ*
Воскресенск	95,07	взвешенные вещества, диоксид азота, аммиак, оксид углерода, фторид водорода	1,7
Дзержинский	215,2	диоксид азота, оксид углерода, бензол, взвешенные вещества, ксилол	0,9
Клин	88,4	диоксид азота, формальдегид, оксид углерода, оксид азота, взвешенные вещества	0,7
Коломна	132,2	формальдегид, диоксид азота, никель, оксид углерода, взвешенные вещества	0,9
Мытищи	275,3	формальдегид, фенол, взвешенные вещества, диоксид азота, бензол	1,0
Подольск	350,6	формальдегид, хлорид водорода, диоксид азота, взвешенные вещества, бензол	1,3
Серпухов	133,7	формальдегид, взвешенные вещества, диоксид азота, оксид азота, оксид углерода	1,4
Щелково	135,9	хлорид водорода, диоксид азота, оксид углерода, взвешенные вещества, никель	1,2
Электросталь	141,7	диоксид азота, никель, оксид азота, оксид углерода, взвешенные вещества	1,0

*СИ (стандартный индекс) при расчёте ПДК атмосферного воздуха — это наибольшая измеренная в городе максимальная разовая концентрация любой примеси, деленная к соответствующей величине ПДК.

Важно отметить, что такие компоненты воздуха как сероводород, аммиак, диоксид азота, диоксид серы, встречаются во всех городах. Указанные газы были выбраны как маркерные компоненты, для которых будут выбираться сорбенты в рамках диссертационного исследования.

Состояние атмосферного воздуха на прямую влияет на здоровье человека. Наиболее распространёнными причинами преждевременной смертности, связанной с загрязнением атмосферного воздуха [7], являются сердечно-сосудистые заболевания [8], в частности, ишемическая болезнь сердца (ИБС) и инсульт [9]. По данным ВОЗ 24% случаев ИБС и 25% случаев инсульта связаны с загрязнением атмосферного воздуха [10].

Человек большую часть времени проводит внутри помещений, воздух в которых грязнее уличного. Поэтому для создания безопасной среды жизнедеятельности людей его необходимо очищать.

Перечень систем очистки воздуха внутри помещений: рециркуляторы, очистители воздуха с фотокаталитическими фильтрами, бризеры.

Рециркулятор. В приборах находится камера с ультрафиолетовой (УФ)-лампой и фильтр грубой очистки, который защищает лампу от крупной пыли. Воздух проходит через камеру с УФ-лампами, облучение которых разрушает бактерии, споры, плесень. В некоторых источниках указывается и разрушение органических соединений [5]. У данного метода есть определенные нюансы, которые важно учитывать в использовании: индивидуальная резистентность микроорганизмов к УФ, запыленность поверхности отражателя и колбы лампы, большое потребление электроэнергии, обязательная утилизация УФ ламп, и также не возможность очистки воздуха от неорганических маркерных веществ.

Очистители воздуха с фотокаталитическими фильтрами. В фотокатализе роль источника энергии играет УФ облучение определённой длины волны, отличной от бактерицидных ламп [11]. Это излучение «возбуждает» молекулы катализатора (диоксид титана), который запускает реакции окисления бактерий, спор и т.п. Важно понимать, что молекула катализатора может окислить только те органические примеси, которые находятся в непосредственной близости, то есть адсорбированы. Очистка воздуха данным методом не рассчитана на удаление неорганических веществ (диоксид азота, серы и т.п.). Ужесточение законодательства, в плане утилизации отработанных фильтров и УФ-ламп, приводит к удорожанию сервисного обслуживания данных систем. Конструкция фотокаталитической системы очистки воздуха сложна и зависит от широкого спектра факторов (интенсивность света, падающего на катализатор, химический состав, концентрация загрязняющих веществ, скорость потока воздуха, уровень влажности и др.) [12].

Бризер. Прибор приточной системы вентиляции, который подает очищенный воздух с улицы в помещение. В приборе применяется комбинация фильтров – грубой очистки класса G4, тонкой очистки E11-H13 и сорбционный фильтр на основе активированного угля. Однако, существующий сейчас сорбционный стандартный фильтр будет малоэффективен для очистки приточного воздуха от выбранных маркерных компонентов.

Из рассмотренных бытовых приборов системы очистки воздуха оптимальным решением является бризер, но с улучшенным сорбционным фильтром. Было принято решение о разработке новых фильтров на основе адсорбционных материалов, эффективно сорбирующих маркерные компоненты. Однако, данные об эффективности и сорбционной емкости сорбентов, предоставляемые фирмами-производителями зачастую неполные, а иногда и вовсе завышены. Поэтому было принято решение о тестировании сорбентов на эффективность и емкость по маркерным веществам. Полученные данные будут представлены на следующем этапе работы.

Для изучения эффективности и оценки полной и динамической обменной емкости сорбентов разработан стенд, состоящий из следующих блоков: подготовки нулевого газа, подачи целевого компонента, увлажнения, узел подготовки хладагента и тестовая камера. Принципиальная схема установки представлена на рис.3.

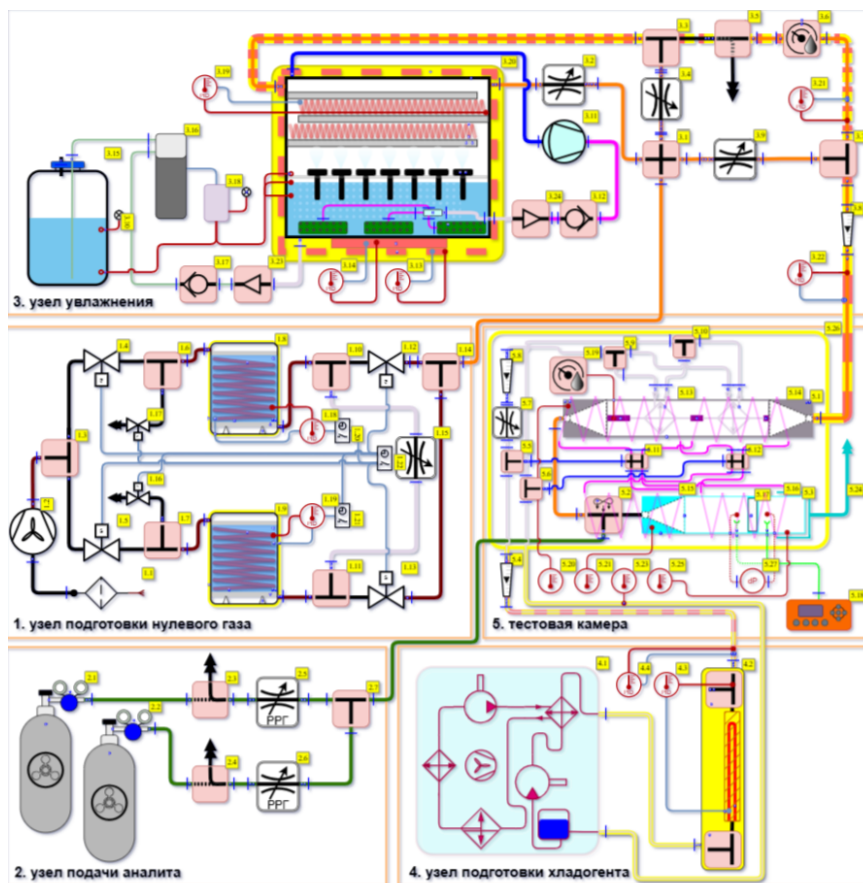


Рисунок 3 - Схема стенда для проведения пилотных испытаний по подбору сорбентов.

В «узле подготовки нулевого газа» происходит забор воздуха из помещения с помощью вентилятора, его прохождение через емкость с осушителем для снижения абсолютной влажности. Узел подачи маркерного компонента представляет собой ряд баллонов с промышленными газовыми смесями максимально возможной концентрации. Перед подачей в тестовую камеру модельный газ увлажняется до заданной величины относительной влажности и подогревается или охлаждается до нужной температуры. Датчиками фиксируются концентрации компонентов и влажность на входе и выходе из ячейки, а также ее аэродинамическое сопротивление.

Определение эффективности, динамической и полной обменной емкости материала будет проводиться на модельных газовых смесях, включающих в себя один маркерный компонент в воздушной среде при различной влажности (относительная влажность воздуха будет измеряться в диапазонах от 10% до 100%) в диапазоне температур от -10°C и до $+50^{\circ}\text{C}$.

Заключение

Работа по улучшению качества воздуха в промышленных городах ведется активно в рамках Федерального проекта «Чистый воздух». Внедрение современных технологий, ужесточение экологических норм и повышение экологической культуры населения позволят улучшить качество воздуха и сохранить здоровье людей и окружающую среду для будущих поколений. Только комплексный подход сможет обеспечить устойчивое развитие промышленных городов и снизить негативное воздействие на атмосферу.

На данный момент, более 10% населения, сосредоточенного в 17 субъектах России, находится в зоне «высокого» и «очень высокого» загрязнения атмосферного воздуха. В основном это Астраханская область, Республика Бурятия и Таймырский АО ($> 75\%$ горожан) [13,14]. В остальных субъектах средние годовые концентрации загрязнителей превышают ПДК локально.

Улучшить состояние воздуха внутри зданий возможно с использованием систем умной приточной вентиляции – бризеров с модифицированным комплектом фильтров на основе адсорбентов и волокнистых ионообменных материалов.

Список литературы

1. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 47-2017. Системы обработки(обращения) со сточными водами и отходящими газами в химической промышленности. Москва, Бюро НДТ 2017.
2. Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2023 году»
3. Глобальная карта ветров, погодных условий. Электронный ресурс:
<https://earth.nullschool.net/ru/#current/wind/surface/level/orthographic=-282.68,56.77,752>
4. КАЧЕСТВО АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА И РИСК РАЗВИТИЯ БОЛЕЗНЕЙ СИСТЕМЫ КРОВООБРАЩЕНИЯ У НАСЕЛЕНИЯ КРУПНОГО ГОРОДА ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА - т.н. Растокина, А.А. Пешкова, Т.Н. Унгурияну. Северный государственный медицинский университет, РФ, 163069 г. Архангельск, УДК 613.15,614.71, 2024г
5. Попова А.С. Методы очистки и обеззараживания воздуха в системах вентиляции. Вестник магистратуры, 2021; ISSN 2223-4047. <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-ochistki-i-obezzarazhivaniya-vozduha-v-sistemah-ventilyatsii>
6. Бюллетень загрязнения окружающей среды московского региона за 2023 г. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральное управление гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ФГБУ «Центральное УГМС»», Москва 2024г.
7. «The respiratory health effects of nitrogen dioxide in children with asthma» European Respiratory Journal 2011 38(2): 303-309; DOI: <https://doi.org/10.1183/09031936.00115409>
8. « Nitrogen dioxide from gas cookers can impact the cardiovascular system» Dr Andrew Webb, Clinical Senior Lecturer at King's College London, 2020
9. КАЧЕСТВО АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА И РИСК РАЗВИТИЯ БОЛЕЗНЕЙ СИСТЕМЫ КРОВООБРАЩЕНИЯ У НАСЕЛЕНИЯ КРУПНОГО ГОРОДА ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА - т.н. Растокина, А.А. Пешкова, Т.Н. Унгурияну. Северный государственный медицинский университет, РФ, 163069 г. Архангельск, удк 613.15,614.71, 2024г
10. Preventing disease through healthy environments: a global assessment of the burden of disease from environmental risks / A. Prüss-Üstün, J. Wolf, C. Corvalán, R. Bos, M. Neira. – Geneva: World Health Organization, 2016. – P. 56–60.
11. Першин А.А., Старков М.В. Адсорбционно-фотокаталитическое устройство для очистки воздуха от летучих загрязнителей. Патент RU 33035 U1, Аэролайф; 2023.
12. Farhanian, D.; Haghighat, F. Photocatalytic oxidation air cleaner: Identification and quantification of by-products. Build. Environ. 2014, 72, 34–43.
13. Информационно-аналитический сайт «Города России». [Электронный ресурс]. – URL: <https://rfgorod.ru/>, свободный (дата обращения: 05.04.22).
14. «КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ГОРОДОВ И РЕГИОНОВ РОССИИ» Р.У. Банкурова, М.М. Басханова, Х.Ф. Батиров. ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет им. А. А. Кадырова», г. Грозный, 2024г.

УДК 628 С247

Захаров С.Л.

Математическая модель распределения пор по значениям их величин в обратноосмотических мембранах

Захаров С.Л. - д.т.н., доц., проф.каф.Инженерное проектирование технологического оборудования
staszaharov@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,
Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В статье представлена вероятностная модель распределения пор по радиусам в мембранах высоконапорного обратного осмоса.

Ключевые слова: моделирование, мембрана, распределение пор по размерам, обратный осмос

Mathematical model of pore distribution by their size values in reverse osmosis membranes

Zakharov S.L.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The article presents a probabilistic model of pore distribution by radius in high-pressure reverse osmosis membranes

Keywords: modeling, membrane, pore size distribution, reverse osmosis

Исследования характеристик пористой структуры мембран представляет большой практический и научный интерес, как для более глубокого понимания механизма мембранного разделения [1-4], так и с точки зрения создания мембран с качественно новыми характеристиками.

К ключевым характеристикам пористости относятся интегральные и дифференциальные кривые распределения количества пор по их размеру. В аналитической форме функция распределения имеет важнейшее значение для решения различных теоретических и прикладных задач. Выражение данной закономерности позволяет:

- обоснованно экстраполировать кривую распределения по всему необходимому диапазону диаметров пор (главным образом для малых диаметров);
- создать предпосылки для качественного моделирования процесса мембранного разделения и других инженерных расчётов;
- эффективно определять общий объём пор и распределение пор по диаметру, исходя из состава частиц, формирующих мембрану;
- сократить количество экспериментальных данных, необходимых для построения кривой распределения и др.

Следует отметить, что в настоящее время при прогнозировании работы аппаратов для микро- и ультрафильтрации учитываются характеристики пористости мембран, но в случае обратного осмоса применяются иные подходы. Объясняется это, прежде всего тем, что в обратном осмосе используются полимерные мембраны. Изучение пористой структуры данного типа мембран сопряжено с рядом трудностей, а зачастую даже невозможно. Общими недостатками мембран на основе полимеров являются нестабильность их селективно-производительных характеристик, небольшая термическая, химическая и бактериологическая стойкость. Тем не менее, даже с учётом перечисленных недостатков аппараты на основе полимерных мембран в настоящее время наиболее эффективны в процессах обратного осмоса.

Для создания предпосылок стабилизации рабочих характеристик полимерных мембран в работе предлагается использовать схему, показанную на рис.1. Включение в схему аппарата на базе мембран из пористого стекла позволяет получать истинное представление о динамике изменения условий протекания процесса, что в свою очередь может быть использовано при сопоставлении тестовых характеристик пористых стёкол с нестабильными характеристиками полимерных мембран.

В качестве стабильных мембран в работе исследовались мембраны из пористого стекла на основе кремнезёма (SiO_2) с различными добавками (Na_2O , Al_2O_3 , CaO , B_2O_3 , Fe_2O_3 и др.). Большое содержание Na_2O (5-10%) способствует образованию взаимопроникающих друг в друга каркасов, в то время как кремнеземная основа обеспечивает формирование непрерывной пространственной сетки [5]. Данный тип

мембран обладает жёсткой структурой, химически и теплоустойчив, работает в широком диапазоне pH [4].

Структурные параметры (объёмная пористость, распределение пор по размерам) данного типа мембран зависят от условий термообработки. Это объясняется тем, что при высоких температурах мелкие поры спекаются, образуя более крупные [6, 7].

Так как мембраны на основе пористого стекла состоят из смеси связанных между собой частиц разных размеров, то пористую основу мембраны формируют пустоты между этими частицами. Следовательно, при анализе поры следует рассматривать как некую статистическую совокупность, а вопросы, связанные с изучением распределения пор по диаметру, целесообразно решать при помощи методов теории вероятности и математической статистики.

Для поиска экспериментальных зависимостей распределения пор по их диаметрам использовались:

- метод электронной микроскопии с использованием преломления рентгеновских лучей при скользящем падении;
- метод ртутной порометрии;
- адсорбционный метод с использованием паров бензола.

При статистической обработке экспериментальных данных строится график зависимости количественных значений сегментов от диаметра пор. Для построения принимается, что изменение размера пор представляет собой непрерывную кривую плотности распределения.

При помощи закона распределения устанавливается связь между возможными значениями размера пор и соответствующими им вероятностями. Наиболее распространёнными формами описания закона распределения являются дифференциальные и интегральные функции (Рис.2)

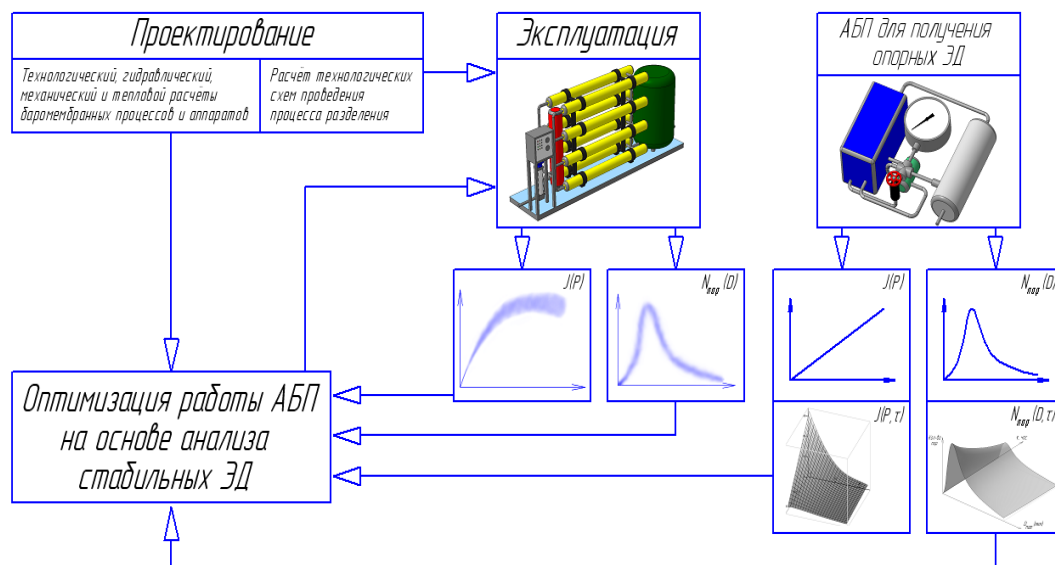


Рисунок 1 - Схема стабилизации рабочих характеристик полимерных мембран с использованием экспериментальной доводки на мембранах из пористого стекла.

Дифференциальная функция распределения (плотность вероятности или кривая распределения) показывает, как часто появляется случайная величина $D_{сл.}$ в некоторой окрестности точки D и может быть выражена как $dN = f(D)dD$,

При том, что
$$\int_0^{\infty} f(D)dD = 1,$$

где dN – доля пор в сегменте; D – диаметр пор, нм.

Преимуществом кривой плотности вероятности $f(D)$ является наглядность. Кривая распределения позволяет определить сегмент с максимальным значением. Но для её качественного построения требуется большое количество экспериментальных данных (ЕД), что обычно затруднительно.

Часто на практике удобнее использовать **интегральную функцию распределения (функция распределения)**, которая представляет собой кумуляту и определяет вероятность того, что случайно взятая пора диаметром $D_{сл}$ будет меньше данного значения D : $F(D) = P(D_{сл} < D)$.

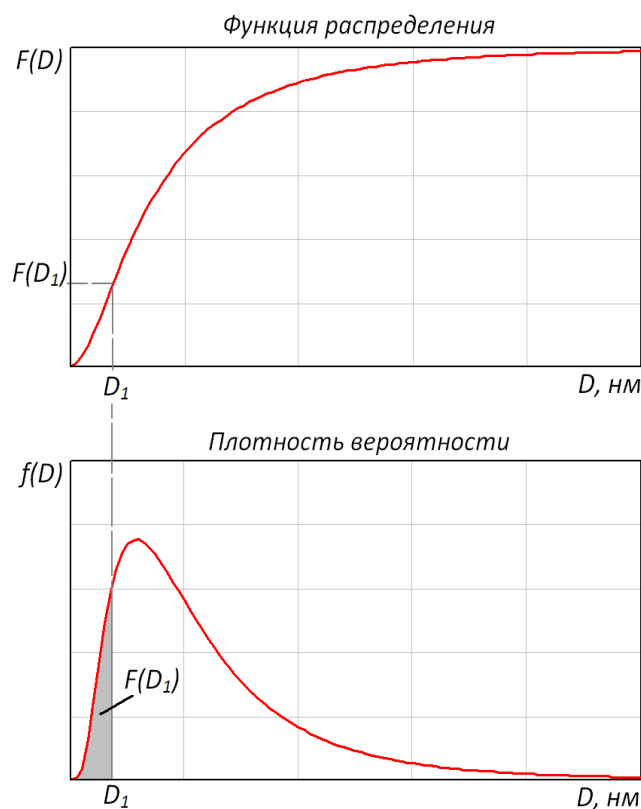


Рисунок 2 - Функция распределения непрерывной случайной величины и ее плотность.

Интегральная кривая распределения не так чувствительна к величине интервалов сегментов, как дифференциальная. В то же время сравнивать характеристики пористости двух мембран удобнее, сопоставляя между собой интегральные кривые.

Плотность вероятности является первой производной от функции распределения, поэтому из плотности распределения всегда можно получить функцию распределения с помощью интегрирования $f(D)$ в интервале от 0 до D .

Чтобы найти вероятность попадания диаметра случайно взятой поры в интервал (a, b) необходимо вычесть значения функции распределения на концах интервала: $P(a \leq \Delta D_{сл} \leq b) = F(b) - F(a)$.

Кривые распределения количества пор по размерам для различных мембран с жёсткой структурой имеют общий устойчивый вид. Однако на сегодняшний день не существует общей методики анализа пористой структуры мембран для обратного осмоса. По этой причине в работе выдвигается гипотеза о возможности распределения пор по логарифмически-нормальному закону аналогично с законом А.Н. Колмогорова для распределения размеров частиц при дроблении.

Обоснование гипотезы о логарифмически-нормальном распределении размеров пор по их количеству

Механизм формирования пор в мембранах с жёсткой структурой тесно связан с составом исходного материала и с распределением частиц в нём. Это объясняется технологией изготовления мембран, включающей процесс измельчения исходных компонентов.

Кривая распределения диаметров частиц по их количеству будет оказывать прямое влияние на распределение диаметров пор по количеству. Предположительно, такие же законы применимы и к реальным мембранам, состоящим из частиц неправильной формы.

Чтобы подтвердить данные рассуждения был проведён эксперимент на боросиликатном стекле, которое представляет собой кремнезёмный каркас с порами, образовавшимися в результате растворения нестойкой щелочноборатной фазы. Структура стекла после травления должна соответствовать логнормальному распределению, т.к. выщелачивается преимущественно один компонент (B_2O_3), прошедший предварительное измельчение.

Плотность вероятности распределения пор по диаметру в таком случае будет выражаться формулой

$$f(D) = \frac{1}{D \cdot \sigma(\ln D) \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln D - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2(\ln D)}}, \quad (1)$$

функция распределения будет иметь следующий вид

$$F(\ln D) = \int_0^{\ln D} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma(\ln D)} \cdot e^{-\frac{(\ln D - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2(\ln D)}} d(\ln D), \quad (2)$$

D – диаметр пор;

$m = \ln D_0$ – математическое ожидание логарифма случайной величины,

где D_0 – медиана распределения;

$\sigma(\ln D)$ – среднее квадратическое отклонение логарифма случайной величины.

Медиана распределения делит все поры на две половины – с $D < D_0$ и $D > D_0$, и представляет собой среднее геометрическое диаметров пор.

При расчётах баромембранных процессов за величину пористости чаще берётся математическое ожидание. Однако логнормальное распределение имеет положительный коэффициент асимметрии

$\left(\frac{\mu_3}{\sigma^3} \right)$, поэтому предпочтительнее в качестве среднего показателя пористости использовать медиану.

Однако, даже зная закон распределения необходимы эффективные методы, позволяющие в короткий срок осуществлять расчёт. Такую возможность даёт современные методы расчёта при помощи ЭВМ.

Нелинейная оптимизация с применением алгоритма Левенберга-Марквардта.

Как известно, при поиске нелинейных параметров модельной функции для некоторого набора экспериментальных данных необходимо минимизировать функцию $f(D)$, представляющую собой сумму квадратов.

$$f(D) = \frac{1}{2} \sum_i \bar{\Phi}(D)^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где под вектором $\Phi(D)$ понимается:

$$\bar{\Phi}(D) = \begin{bmatrix} \varphi(D_1, a_0, a_1, \dots, a_m) - N_1 \\ \varphi(D_2, a_0, a_1, \dots, a_m) - N_2 \\ \dots \\ \varphi(D_m, a_0, a_1, \dots, a_m) - N_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

где φ – известная функция вида (1) или (2);

$a_0, a_1, \dots, a_m$ – неизвестные постоянные коэффициенты эмпирической формулы;

N_m – количество пор соответствующего диаметра d_m .

Основной задачей является поиск наименьшей в точке оптимума невязки $\|\Phi(D)\|$.

Наиболее простым способом поиска минимума функции является *градиентный метод*, согласно которому параметр приближения определяется на каждом последующем шаге по формуле

$$x_i = x_i - \lambda \nabla f. \quad (5)$$

Однако такой метод не всегда эффективен. При поиске минимума желательно выполнять спуск малым приближением в области большого градиента, чтобы точно определить минимум функции, и большим приближением там, где градиент мал. Но согласно формуле (5) осуществляются прямо противоположные итерации. Помимо этого, неодинаковая в различных направлениях кривизна поверхности невязки при использовании формулы (2.5) будет приводить к неблагоприятному перемещению.

В такой ситуации можно использовать вторые производные, как это предлагается в *методе Ньютона-Гаусса* для уравнения $\nabla f(x) = 0$. Для этого градиент f раскладывается в ряд Тейлора без учёта членов высокого порядка

$$\nabla f(x) = \nabla f(x_0) + (x - x_0)^T \nabla^2 f(x_0). \quad (6)$$

Для поиска минимума левая часть уравнения (6) приравнивается нулю и параметр приближение на каждом последующем шаге будет вычисляться по формуле

$$x_{i+1} = x_i - \left(\nabla^2 f(x_i) \right)^{-1} \nabla f(x_i). \quad (7)$$

Из уравнения (7) видно, что алгоритм Ньютона-Гаусса обладает хорошей сходимостью.

Преимущества обоих методов были объединены Левенбергом и выражены следующим уравнением

$$x_{i+1} = x_i - (H + \lambda I \nabla^2 f(x_i))^{-1} \nabla f(x_i) \quad (8)$$

где H – матрица Гессе для точки x_i .

Чтобы данный алгоритм работал ещё эффективнее позже Марквардом было предложено заменить в формуле (2.8) единичную матрицу на диагональ гессеана $(diag[H])$. Это позволяет увеличить шаг вдоль направлений малого градиента. Таким образом, окончательно алгоритма *Левенберга-Марквардта* имеет вид

$$x_{i+1} = x_i - \left(H + \lambda diag[H] \right)^{-1} \nabla f(x_i). \quad (2.9)$$

Для построения функций распределения с наилучшими параметрами в работе применялся алгоритм Левенберга-Марквардта. Комбинируя в себе метод минимизации вдоль градиента (метод наискорейшего спуска) и метод Ньютона-Гаусса, алгоритм Левенберга-Марквардта превосходит их по производительности. Подробнее данный алгоритм можно рассмотреть в работе [8].

Реализация алгоритма Левенберга-Марквардта в среде MathCAD.

При обработке экспериментальных данных в работе использовалась программа MathCAD, решение задачи нелинейной регрессии в которой осуществляется при помощи встроенной функции *Minerr*. Она возвращает ответ, который минимизирует соответствующий функционал невязки экспериментальных данных и модельной функции.

Используемый MathCAD алгоритм Левенберга-Марквардта можно представить в виде блок-схемы. Для проверки предложенной методики было проведено исследование пористой структуры жёсткой мембраны на основе боросиликатного стекла, результаты которого представлены на рис.2. На основании данных результатов можно сделать вывод, что логарифмически-нормальное распределение хорошо коррелирует с экспериментальными данными по пористости мембран из пористого стекла и может применяться в расчётах баромембранных процессов. Предложенный в работе метод является эвристическим, но эффективно работает на практике.

Следует заметить, что при анализе кривых распределения количества пор по размерам производительность у пор разного диаметра будет отличаться. Следовательно, величина их вклад в общую селективность мембраны также будет разной.

Дальнейшее изучение характеристик пористости имеет большое значение для будущего мембранных процессов. Важно понять процесс формирования пор при изготовлении мембран и перераспределение пористости в процессе их эксплуатации. Особенно это касается изучения полимерных мембран, определение пористости в которых затруднительно.

Также раскрытие механизма распределения пор по размеру немаловажно для изучения мембран, образованных в результате сорбции дисперсных частиц (динамических мембран), т.к. исследование их пористости классическими методами невозможно из-за крайне низкого коэффициента их стабильности.

Список литературы

1. Дытнерски Ю.И.
2. Каграманов Г.Г, Фарносова Е.Н. Нанофильтрация и обратный осмос: сравнение и области оптимального применения // ВОДА MAGAZINE. 2017. №6. С. 24-27.
3. Свитцов А.А., Кручинина Н.Е. Чем хороши и кому доступны наилучшие доступные технологии // Экология и промышленность России. 2018. Т.22, №3. С. 60-63.
4. Захаров С.Л. Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2024. №1. С. 20-24
5. Яковлев Е.Б. «Особенности поведения стёкол и стеклообразных материалов при быстром нагревании», СПбГУИТМО, Санкт-Петербург, 2004.
6. Волкова А.В., Ермакова Л.Э., Сидорова Л.Э., Антропова Т.В., Дроздова И.А. Влияние термообработки на структурные и электрокинетические свойства мембран из пористых стекол // Коллоидный ж. 2005. Т. 67. №3. С. 299-307.
7. Волкова А.В., Ермакова Л.Э., Сидорова М.П., Антропова Т.В., равновесные и транспортные характеристики пористых стеклянных мембран различного состава // Труды III научной сессии УНЦСПбГУ 2004. С. 178-179.
8. Ловецкий К.П., Севастьянов Л.А., Паукшто М.В., Бикеев О.Н. Математический синтез оптических наноструктур; М.: РУДН. 2008. -123 с. наноструктур; М.: РУДН. 2008. -123 с.

УДК 678.675: 66.067.38

Каталевский А.Д., Смирнова Н.Н.

Ультрафильтрационные мембраны на основе ароматических сополиамидов

Каталевский Артем Дмитриевич – аспирант; ak@vladisart.ru

Смирнова Наталья Николаевна – д.х.н., профессор кафедры химии, директор института биологии и экологии

Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая

Григорьевича Столетовых, г. Владимир, 600000, ул. Горького, д. 87

В тезисах рассмотрено влияние наличия и концентрации сульфонатных групп на транспортные характеристики ультрафильтрационных мембран на основе ароматических сополиамидов в процессе фильтрации раствора бычьего сывороточного альбумина при pH ниже, выше и равном его изоэлектрической точке.

Ключевые слова: ароматические сополиамиды; мембраны; ультрафильтрация; массообменные свойства

Ultrafiltration membranes based on aromatic copolyamides

Katalevskiy A.D., Smirnova N.N.

Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov, 600000, Vladimir, Gorky str., 87

The theses consider the effect of the presence and concentration of sulfonate groups on the transport characteristics of ultrafiltration membranes based on aromatic copolyamides during filtration of bovine serum albumin solution at pH below, above and equal to its isoelectric point.

Key words: aromatic copolyamides; membranes; ultrafiltration; mass transfer properties

Введение

На протяжении последних тридцати лет ароматические полиамиды рассматривались как перспективные системы для получения мембран разной структуры. Способность полиамидов к структурной трансформации за счет изменения состава и строения диаминных и дикислотных мономеров определяет столь широкий круг областей мембранного разделения, в которых материалы на основе ароматических полиамидов (АПА) нашли применение, причем полимер может выполнять роль как мембранообразующей основы, так и формировать ультратонкий слой на матрице любой природы.

Введение в макромолекулу АПА ионных групп является инструментом изменения их гидрофильности, массообменных характеристик, а также адсорбционных и антибактериальных свойств [1, 2]. Начиная с конца прошлого века появилось более сотни работ, в которых была показана возможность и продемонстрирована эффективность применения для изготовления мембран сульфонатсодержащих ароматических поли- и сополиамидов, синтезированных в АО «Полимерсинтез» [3]. Их уникальность заключалась в варьировании концентрации ионных групп в макромолекулярной цепи от 1 до 100 мол.%, что позволило получить линейку полимеров от растворимых в амидных растворителях до водорастворимых, а строение аминного и хлорангидридного компонентов открыло возможность регулирования свойств мембран за счет структуры и конформационного состояния макромолекул полиамидов. Цель настоящей работы — оценка степени влияния наличия и концентрации сульфонатных групп в макромолекуле полиамида на массообменные характеристики полученных мембран в процессе ультрафильтрации белковых растворов.

Экспериментальная часть

Поли-м-фениленизофталамид (ПА) и статистический сополиамид, содержащий 1 (ПА-1), 3 (ПА-3), 5 (ПА-5) и 10 (ПА-10) мол.% звеньев с сульфонатными группами синтезированы в ОАО «Полимерсинтез». Для получения мембран использовали полимер и сополимер со среднечисловой молекулярной массой $\sim 4.0 \cdot 10^4$. Мембраны изготавливали на подложке из нетканого лавсанового материала фазоинверсионным методом мокрого формования. Номинально отсекаемая молекулярная масса образцов 25 – 30 кДа. Результаты исследования их электроповерхностных свойств представлены в таблице 1.

Таблица 1

Электроповерхностные свойства полиамидных мембран

Мембрана	ПА	ПА-1	ПА-3	ПА-5	ПА-10
ζ - потенциал, мВ	+2.4	-5.3	-14.7	-25.5	-43.8

Для проведения экспериментов использовали бычий сывороточный альбумин (Sigma) с молекулярной массой 66 кДа, размером молекулы $150 \times 40 \times 45$ Å, величиной стоксовского радиуса 34 Å и значением $pI = 4.9$. Для приготовления раствора применяли универсальный буфер с pH равным 3.3, 4.9 и 8.0.

Для исследований массообменных характеристик мембран использовали тупиковую разделительную ячейку. Исследования проводили при давлении 0.1 МПа, концентрация белка в буферном растворе при соответствующем значении pH равна $0.2 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1}$. Давление в системе поддерживали с помощью сжатого азота. Контроль pH осуществляли с помощью pH-метра («ЭКСПЕРТ-001»). Объем фильтруемого раствора составлял 40 мл.

Концентрацию белка определяли с помощью спектрофотометра СФ-2000 (ОКБ «Спектр») по оптической плотности при длине волны $\lambda = 278$ нм.

Селективность мембран определяли по формуле:

$$R = \left(\frac{c_0 - c_f}{c_0} \right), \quad (1)$$

где c_f и c_0 – концентрация белка в фильтрате и исходном растворе соответственно, $\text{г} \cdot \text{л}^{-1}$.

Для расчета удельной производительности мембран использовали формулу:

$$I = \frac{V}{(t \cdot S)}, \quad (2)$$

где V – объем фильтрата, мл; t – время эксперимента, мин; S – площадь мембраны, см^2 .

Как и можно было предположить, кулоновские силы мембрана/белок в значительной степени определяют транспортные характеристики полученных мембран. Наблюдается корреляция между содержанием сульфонатных групп в сополиамиде и степенью снижения их удельной производительности (рис. 1-3).

Адсорбционная емкость мембран на основе сополиамида, содержащего 1% звеньев с сульфонатными группами, изменяется при ультрафильтрации с $0.052 \text{ мг} \cdot \text{см}^{-2}$ при $\text{pH} < pI_{\text{белка}}$ до $0.040 \text{ мг} \cdot \text{см}^{-2}$ в случае $\text{pH} > pI_{\text{белка}}$. Увеличение в составе сополиамида концентрации звеньев с сульфонатными группами до 10% приводит к изменению значений адсорбции до 0.087 и $0.011 \text{ мг} \cdot \text{см}^{-2}$ соответственно.

Вероятно, именно различие адсорбционной активности полученных образцов является основной причиной снижения их удельной производительности. Однако при $\text{pH} > pI_{\text{белка}}$, когда поверхность мембраны и белковая макромолекула заряжены одноименно, увеличение содержания в полиамиде звеньев с сульфонатными группами с 1 до 10 мол.% приводит к росту удельной производительности мембран в этой области практически в 2 раза. При $\text{pH} < pI_{\text{белка}}$ максимальная селективность составляет для ПА-1 0.95, а для ПА-10 0.99. При $\text{pH} = pI_{\text{белка}}$ селективность мембран в ходе эксперимента монотонно снижается. Максимальное значение R равно для ПА-1 0.95, а для ПА-10 0.92. При $\text{pH} > pI_{\text{белка}}$ на кинетической зависимости можно выделить отрезок, в границах которого селективность мембран изменяется незначительно (этот интервал расширяется с ростом величины ζ -потенциала поверхности образца), затем R снижается. Максимальное значение селективности при $\text{pH} > pI_{\text{белка}}$ составляет для ПА-1 0.95, а для ПА-10 0.99.

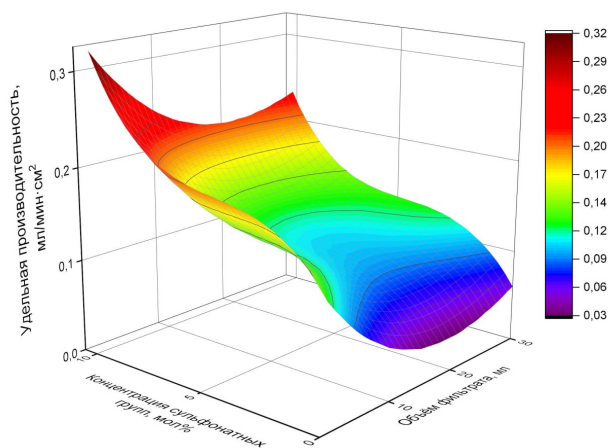


Рисунок 1- Кинетические зависимости удельной производительности мембран с различным содержанием сульфонатных групп при фильтрации раствора БСА с $pH = 3,3$

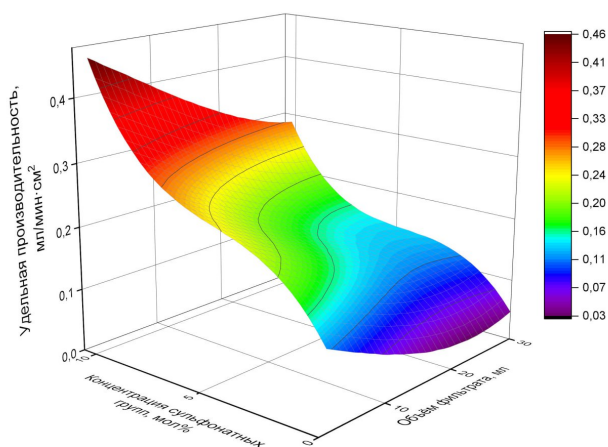


Рисунок 2 - Кинетические зависимости удельной производительности мембран с различным содержанием сульфонатных групп при фильтрации раствора БСА с $pH = 4.9$

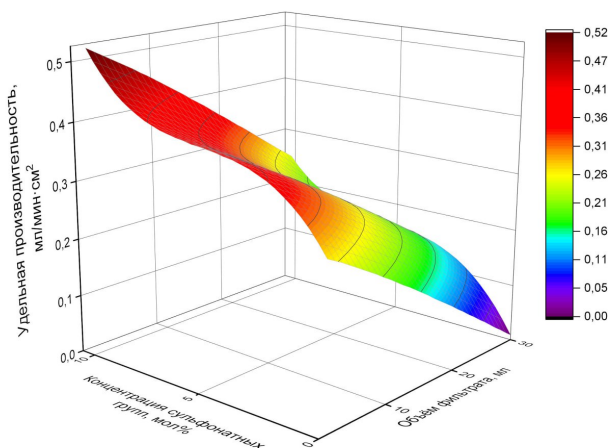


Рисунок 3 - Кинетические зависимости удельной производительности мембран с различным содержанием сульфонатных групп при фильтрации раствора БСА с $pH = 8.0$

Заключение

Кулоновские силы мембрана/белок в значительной степени определяют механизм загрязнения синтезированных мембран. Наблюдается корреляция между содержанием сульфонатных групп в

сополиамиде, адсорбционной активностью полученных на его основе мембран, скоростью и степенью снижения их удельной производительности.

Взаимосвязь между составом сополимеров сульфонатсодержащих ароматических полиамидов, электроповерхностными, транспортными и разделительными характеристиками мембран, полученных на их основе, позволяет синтезировать мембраны с регулируемыми свойствами. Предложенный путь можно рассматривать как один из возможных в этом направлении.

Список литературы

1. O'Harra K.E., Kammakakam I., Noll D.M., Turflinger E.M., Dennis G.P., Jackson E.M., Bara J.E. *Membranes*. 2020. V. 10. P. 51.
2. Hu Y., Lu J., He C., Wang W., Wang D. // *Mater. Today Commun.* 2023. V. 35. P 105674.
3. Атрощенко Ю.М., Шахкельдян И.В., Гитис С.С., Субботин В.А., Федотов Ю.А., Зотова Н.И. Пат. РФ. № 2119910, заявл. 27.11.1992; опубл. 10.10.1998.

УДК 66.021.3, 66.081.63

Кириченко Н.Б.

Численно-аналитическое решение задач о стационарном и нестационарном пограничном слое в баромембранных процессах

Кириченко Николай Борисович, к.т.н., руководитель группы направления системных проектов АНО «НТЦ ЦК», Россия, Москва, 119607, Раменский бульвар, 1 (кластер «Ломоносов»), n.kirichenko@ntc-ss.ru.

В тезисах рассмотрен способ и результаты численно-аналитического решения уравнения конвективной диффузии (нестационарный и стационарный случай), описывающего процесс мембранного разделения, путем аналитического решения преобразованных по Лапласу уравнений и последующего численного обращения преобразования Лапласа.

Ключевые слова: уравнение конвективной диффузии, баромембранные процессы, численное обращение преобразования по Лапласу, концентрационная поляризация

Numerical-analytical solution of stationary and nonstationary boundary layer problems in baromembrane processes

Kirichenko N.B.¹

¹ Autonomous non-profit organization «Scientific and Technical Center for Digital Cryptography», Moscow, Russian Federation

The theses consider the method and results of the numerical-analytical solution of the convective diffusion equation (nonstationary and stationary cases), which describes the process of membrane separation by analytically solving the Laplace transformed equations and the subsequent numerical reversal of the Laplace transform.

Keywords: convective diffusion equation, baromembrane processes, numerical inversion of the Laplace transform, concentration polarization

Введение

Повышение производительности современных мембран при проведении баромембранных процессов (обратного осмоса, нано- и ультрафильтрации) приводит к закономерному возрастанию внешнEDIFFУЗИОННОГО сопротивления массообмену в пограничном слое, образованном задерживаемым компонентом вблизи мембраны, которое в литературе по баромембранным процессам принято называть «концентрационной поляризацией» [1]. Концентрационная поляризация (далее – КП) всегда приводит к ухудшению качества проникающего через мембрану раствора («пермеата») из-за повышения концентрации растворенного компонента у поверхности мембраны, а также к снижению производительности мембранных аппаратов. Кроме того, это явление негативно сказывается на процессах осадкообразования на мембранах и, как правило, приводит к их ускоренному выходу из строя.

Теоретическая часть

Снижение КП до приемлемого уровня является важнейшим принципом организации баромембранных процессов. Однако при описании КП часто используются упрощенные соотношения, имеющие сомнительную валидность. Прежде всего это «пленочная модель», связывающая скорость проникания и коэффициент массоотдачи, рассчитываемый по аналогии с процессами тепло- и массообмена, либо определяемый экспериментально. В нашей диссертации было показано, что «величина КП», рассчитываемая при помощи «пленочной модели» [1] сильно отличается от значений, получаемых при решении уравнения конвективной диффузии, точнее описывающего процесс. Форма же профиля концентраций в примембранном пространстве в пленочной модели и вовсе не рассматривается. Однако для развития теоретических исследований мембранных процессов – именно вопрос о профиле концентраций имеет фундаментальное значение. Знание формы профиля позволяет оценить («обратным ходом») корректность принятых допущений, создавать приближенные модели массообмена с учетом новых факторов, а также математически исследовать вопрос о конвективной устойчивости течения, что и было нами ранее осуществлено в работе [2] с получением критических чисел Рэлея. Таким образом, режим смешанно-конвективного массообмена, экспериментально исследованный в газоразделительных мембранных аппаратах (путем изучения картины течения в напорном канале в интерферометре Маха-Цендера) [3], был предсказан и экспериментально проверен и для баромембранных процессов с получением конкретных

параметров (скорость течения, селективность, концентрация) для условий его возникновения [4].

Возвращаясь к решению задачи о диффузионном пограничном слое в примембранном пространстве, кратко опишем разработанный метод и полученные результаты. Предлагаемый способ численно-аналитического решения задачи состоит из трех частей:

аналитического преобразования по Лапласу линейного дифференциального уравнения в частных производных и необходимых граничных условий;

получения решения обыкновенного дифференциального уравнения преобразованных по Лапласу функций;

численного обращения преобразования по Лапласу с получением искомого решения в виде зависимости концентрации от остальных параметров.

Решение задачи о нестационарном массообмене развивает ранее использованный [2] подход к численно-аналитическому решению задачи о стационарном массообмене вблизи мембранной поверхности.

Данный способ может быть реализован на обычном ПК в среде MATHCAD. Единственной сложностью, возникающей в процессе численно-аналитического решения, является вывод аналитического решения, преобразованного по Лапласу.

Следует отметить, что возникающее при переходе от нестационарной к стационарной задаче повышение числа переменных задачи приводит к существенным вычислительным трудностям, связанным с потерей числовой устойчивости решения. Поиск путей их разрешения привел к реализации алгоритма расчетов с блоком проверки, о котором будет рассказано далее.

Проведем сравнительный анализ решения уравнения конвективной диффузии при мембранном процессе для стационарного и нестационарного течения. Общие допущения связаны с постоянством температуры и давления в напорном канале, рассматривается разделение разбавленного раствора, так что всеми эффектами, связанными с изменением плотности и коэффициентов переноса мы пренебрегаем, из этого же предположения следует, что мы пренебрегаем изменением осмотического давления по длине канала, следовательно мы можем принять скорость проникновения V равной постоянной величине. Так же мы, вследствие изложенного, пренебрегаем влиянием изменения плотности на гидродинамическую картину течения в канале, т.е. рассматриваем несопряженную задачу о массообмене. Тогда система уравнений Навье-Стокса для нашей задачи сведется к уравнению конвективной диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} + V \frac{\partial C}{\partial Z} - U \frac{\partial C}{\partial X}, \quad (1)$$

при а) $\frac{\partial C}{\partial t} \equiv 0$ имеем уравнение стационарного процесса,

при б) $\frac{\partial C}{\partial t} \geq 0$ имеем уравнение нестационарного процесса,

при в) $U \equiv 0$ имеем уравнение нестационарного одномерного процесса (физически соответствует разделению в тупиковом режиме), ниже мы покажем, что случай (1в) является асимптотическим для решения задачи (1б).

Аналитическое решение задачи (1в) было получено нами ранее с помощью преобразования Лапласа (при аналитическом же обращении), в силу громоздкости приводить его не будем (подробнее см. в [5]).

Дальнейшее упрощение задачи связано с особенностями баромембранных процессов. При больших числах Шмидта ($Sc \gg 1$) и при ламинарном течении в канале диффузионный пограничный слой, как мы предполагали (с последующей проверкой), является «затопленным» по отношению к гидродинамическому. В этой связи профиль скоростей в пределах диффузионного пограничного слоя считаем приближенно-линейным: $U = bZ$ (рис. 1).

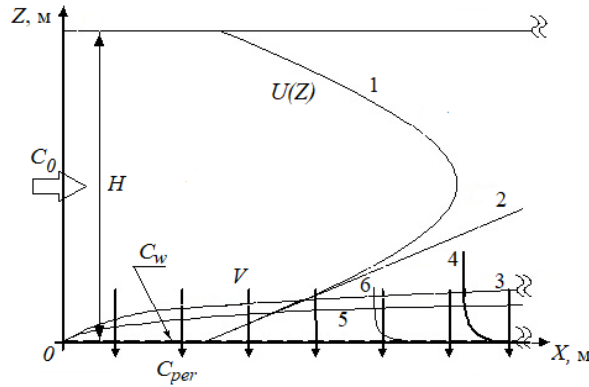


Рисунок 1 - Схема развития концентрационного пограничного слоя в окрестности плоской мембраны при больших числах Шмидта: 1 – профиль продольной скорости течения раствора $U(Z)$ в плоском канале высотой H ; 2 – линейаризованный в окрестности стенки профиль $U(Z) = bZ$; 3 – стационарный ($\tau \rightarrow \infty$) диффузионный пограничный слой; 4 – стационарный профиль концентраций; 5 – нестационарный диффузионный пограничный слой; 6 – нестационарный профиль концентраций; стрелки – проникание с постоянной скоростью; штриховая линия – мембрана с постоянной селективностью ϕ .

Для профиля Пуазейля (с помощью которого можно приближенно описать профиль течения в плоском напорном канале при $V \ll U$) $b = 6\bar{U}/H$, где $\bar{U}$ – средняя продольная скорость в канале, H – высота канала.

Далее запишем уравнение (1) в безразмерных переменных на основе преобразований $c = \frac{c-c_0}{c_0}$, $z = \frac{Z}{\delta}$, $\xi = \frac{XV}{\delta^2 b}$, $\tau = \frac{Vt}{\delta}$, где $\delta = \frac{D}{V}$ – характерный линейный размер диффузионного пограничного слоя, имеем:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + \frac{\partial c}{\partial z} - z \frac{\partial c}{\partial \xi}, \quad (2)$$

В стационарном случае ($\frac{\partial c}{\partial \tau} = 0$) использовали преобразование Лапласа $c^*(z, k) = L_k(c(z, \xi))$, где $L_k(c(z, \xi)) \equiv \int_0^\infty c(z, \xi) e^{-k\xi} d\xi$, с граничным условием, специфическим для массообмена на мембране [2,5]:

$$\frac{\partial c_w}{\partial z} = -\phi(c_w + 1), \quad (3)$$

(где c_w – концентрация на стенке (от англ. wall), при $z = 0$, производная так же берется при $z = 0$) и иных разумных начальных и граничных условиях ($C = C_0$ везде, кроме области диффузионного пограничного слоя), с получением преобразованного по Лапласу уравнения конвективной диффузии (2), которое в указанном случае переходит в обыкновенное дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 c^*}{dz^2} + \frac{dc^*}{dz} - kzc^* = 0, \quad (4)$$

сводящееся к уравнению Бесселя [6] с решением:

$$c^*(z, k) = \frac{\phi e^{-\frac{z}{2}} \sqrt{z + \frac{1}{4k}} \times K_{\frac{1}{3}} \left[\frac{2\sqrt{k}}{3} \left(z + \frac{1}{4k} \right)^{\frac{3}{2}} \right]}{\sqrt{\frac{k}{4}} \left[(0.5 - \phi) K_{\frac{1}{3}} \left(\frac{1}{12k} \right) + \frac{1}{2} K_{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{12k} \right) \right]}, \quad (5)$$

где $K_n(x)$ – функция Макдональда (модифицированная Бесселева функция второго рода) порядка n (в данном случае $n = 1/3, 2/3$).

В нестационарном случае проводя двойное преобразование Лапласа по соотношениям

$$c^{**}(z, k, p) = L_p \left(L_k(c(z, \xi, \tau)) \right) = L_{p,k}(c(z, \xi, \tau)), \quad (6)$$

$$\text{где } L_k(f(z, \xi, \tau)) \equiv \int_0^\infty f(z, \xi, \tau) e^{-k\xi} d\xi, L_p(f(z, \xi, \tau)) \equiv \int_0^\infty f(z, \xi, \tau) e^{-p\tau} d\tau,$$

относительно уравнения (2) получили аналогичное (4) уравнение, так же сводящееся к уравнению Бесселя:

$$\frac{d^2 c^{**}}{dz^2} + \frac{dc^{**}}{dz} - kz c^{**} - p c^{**} = 0, \quad (7)$$

Не приводя громоздких выкладок, сразу дадим решение уравнения (7) с граничным условием (3), общим для стационарных и нестационарных процессов:

$$c^{**}(z, k, p) = \frac{\varphi e^{-\frac{z}{2}\sqrt{z + \frac{p+0.25}{k}}} K_{\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{3}\sqrt{k}\left(z + \frac{p+0.25}{k}\right)^{\frac{3}{2}}\right)}{kp\sqrt{\frac{p+0.25}{k}}\left((0.5-\varphi)K_{\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{3}\sqrt{k}\left(\frac{p+0.25}{k}\right)^{\frac{3}{2}}\right) + \sqrt{p+0.25}K_{\frac{2}{3}}\left(\frac{2}{3}\sqrt{k}\left(\frac{p+0.25}{k}\right)^{\frac{3}{2}}\right)\right)}, \quad (8)$$

Численное обращение уравнений (5) и (8) дает искомое распределение концентраций в диффузионном пограничном слое в стационарных и нестационарных условиях. Обращение проводится по известным формулам интеграла Римана-Меллина [7, 8]

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-j\infty}^{\sigma+j\infty} F(p) e^{pt} dp, \quad (9)$$

где $f(t)$ – оригинал (искомая функция), $F(p)$ – изображение по Лапласу.

Записывая интеграл Римана-Меллина (9) символически $f(t) = L_p^{-1}(f^*(t))$, для случая одномерного обращения уравнения (5) имеем $c(z, \xi) = L_k^{-1}(c^*(z, k))$, а для случая двумерного обращения уравнения (8) имеем $c(z, \tau, \xi) = L_k^{-1}(L_p^{-1}(c^*(z, k, p)))$, где нижний индекс означает параметр, по которому происходит обращение.

Таким образом процедура двойного обращения требует, с формальной точки зрения, просто двукратного применения алгоритма однократного обращения каждый раз по своей переменной. Указанные алгоритмы можно найти в работе [8].

Не приводя здесь довольно громоздкую формулу численного обращения (следует сказать, что использованные формулы численного обращения основаны на сведении интеграла Римана-Меллина к интегралам по действительным переменным), сразу перейдем к характеру трудностей ее вычисления.

Алгоритм численного обращения оказывается устойчивым к изменению параметра σ в случае однократного обращения (особенности задачи накладывают лишь одно теоретическое ограничение $\sigma > 0$).

При этом при однократном обращении трудности связаны с интегрированием в (9) осциллирующих функций на «бесконечном» промежутке (в реальности, конечно же, ограниченном).

В случае двукратного обращения алгоритм оказывается глобально неустойчивым, однако в узком диапазоне величин $\sigma_1 > 0$ (для обращения по параметру p), $\sigma_2 > 0$ (для обращения по параметру k) и при применении отдельной процедуры подбора σ_1, σ_2 дает удовлетворительные результаты. Естественным критерием успешности такого подбора служит удовлетворение результата исходному уравнению (8) и граничному условию (3) (с численным вычислением соответствующих производных). Процедура двойного интегрирования и подбора с циклической проверкой указанного постулата сильно замедляет выполнение алгоритма, но тем не менее, он остается реализуемым на обычном ПК за приемлемое время.

Примеры результатов расчетов разгонных кривых $c_w(\tau)$ (при типичном значении селективности обратноосмотической мембраны $\varphi = 0.8$) приведены ниже, на рис. 2, 3, 4, 5.

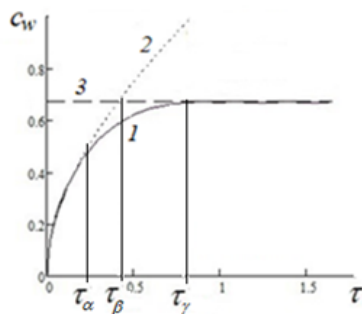


Рисунок 2 - Зависимость (кривая 1) безразмерной концентрации на мембране c_w от безразмерного времени τ при значении селективности $\phi = 0.8$ и $\xi = 0.1$. Мелким пунктиром (кривая 2) показано одномерное решение (1в), а крупным пунктиром (кривая 3) – стационарное решение уравнения (1а). Дополнительно нанесено три характерных, для всех кривых разгона, времени: τ_α – время, до которого одномерное решение (1в) и двумерное нестационарное решение (1б) совпадают, τ_β – точка пересечения решений стационарного уравнения (1а) и нестационарного одномерного уравнения (1в), τ_γ – время, после которого решение нестационарного уравнения (1б) совпадает с решением стационарного уравнения (1а).

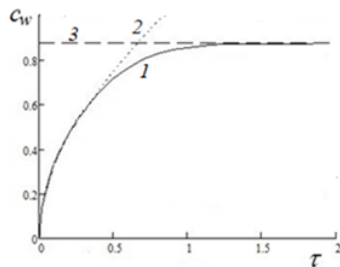


Рисунок 3 - . Зависимость (кривая 1) безразмерной концентрации на мембране c_w от безразмерного времени τ при значении селективности $\phi = 0.8$ и $\xi = 0.2$. Остальные обозначения аналогично рис. 2.

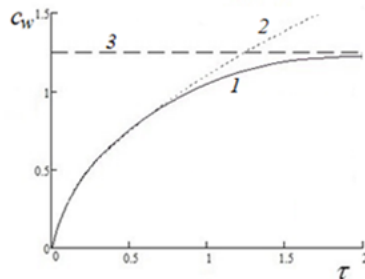


Рисунок 4 - Зависимость (кривая 1) безразмерной концентрации на мембране c_w от безразмерного времени τ при значении селективности $\phi = 0.8$ и $\xi = 0.5$. Остальные обозначения аналогично рис. 2.

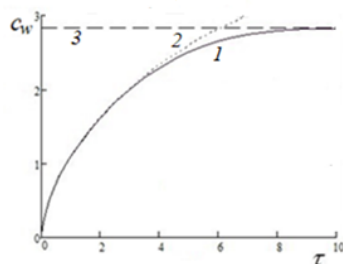


Рисунок 5 - Зависимость (кривая 1) безразмерной концентрации на мембране c_w от безразмерного времени τ при значении селективности $\phi = 0.8$ и $\xi = 5$. Остальные обозначения аналогично рис. 2

Форма нестационарного профиля концентраций приведена на рис. 6. Из теоремы о единственности решения дифференциального уравнения (16) следует (и мы проверили это практическим расчетом), что совпадение кривых разгона на мембране есть частный случай совпадения всего решения для поля концентраций. На рис. 6 показано, что, действительно, имеет место совпадение нестационарных профилей концентраций, рассчитываемых численно (задача (16)) и аналитически (задача (1в)) вплоть до точки τ_a (см. рис. 2).

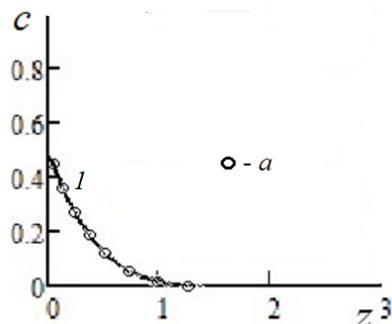


Рисунок 6 - Зависимость безразмерной концентрации c от безразмерного расстояния до стенки z по результатам численного расчета по алгоритму рис. 4 при параметрах: $\varphi = 0.8$; $\xi = 0.1$; $\tau = \tau_a = 0.25$: сплошная линия 1. Кружочками (a) обозначены результаты расчета по аналитическому уравнению для решения одномерной задачи (1в).

Заключение

Разработанный численно-аналитический метод решения уравнений математической физики с двумя и тремя независимыми переменными был применен к решению уравнений конвективной диффузии, описывающих процесс мембранного разделения, с получением зависимостей для концентрации от расстояния от входа в плоский мембранный канал и профилей концентрации для нестационарного и стационарного разделения при больших числах Шмидта, характерных для баромембранных процессов. При начале разгонного процесса кривые разгона и профили концентрации, как оказалось, хорошо описываются аналитическими выражениями, ранее выведенными для одномерного нестационарного массообмена. При больших временах процесса для нестационарного процесса наблюдается плавный, экспоненциально-подобный переход к уровням концентрации, рассчитываемым для стационарного процесса.

Список литературы

1. Дыгнерский Ю.И. Баромембранные процессы. Теория и расчет. М.: Химия, 1986.
2. Кириченко Н.Б. Стационарный массообмен при продольном обтекании плоской селективно-проницаемой стенки. Теорет. основы хим. технологии. 2004. Т. 38. № 4. С. 341.
3. Калика Г.З. Массообмен в каналах с селективно-проницаемыми стенками в условиях концентрационной неустойчивости. Дис. канд. тех. наук. М.: МХТИ, 1992.
4. Кириченко Н.Б. Естественная конвекция в горизонтальной непроточной обратноосмотической ячейке. Теорет. основы хим. технологии. 2005. Т. 39. № 3. С. 1.
5. Кириченко Н.Б. Аналитическое решение дифференциального уравнения одномерного нестационарного массообмена в канале с селективно-проницаемой стенкой. Рук. деп. в ВИНТИ № 1295-В-2003 от 07.07.2003.
6. Бэйтмен Г., Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции: справочник. Том 2. Функции Бесселя, функции параболического цилиндра, ортогональные многочлены. М.: Наука, 1974.
7. Диткин В.А., Прудников А.П. Операционное исчисление. М.: Высшая школа, 1966.
8. Крылов В.И., Шульгина Л.Т. Справочная книга по численному интегрированию. М.: Высшая школа, 1966.

УДК 622.765.4

Ковалева А.А., Кулевец П.С., Левданский А.Э.

Разработка способов флотационного разделения полимерных смесей

Ковалева Анастасия Александровна – младший научный сотрудник кафедры процессов и аппаратов химических производств;

Кулевец Полина Сергеевна – инженер кафедры процессов и аппаратов химических производств;

Левданский Александр Эдуардович – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой процессов и аппаратов химических производств; alex_levdansky@mail.ru

Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», Беларусь, Минск, 220630, улица Свердлова, 13а.

Рассмотрены актуальные вопросы механической переработки пластмассовых отходов. Выявлено, что в области механического рециклинга пластмассовых отходов остро стоит вопрос их сортировки. Наиболее перспективным методом разделения смеси пластмасс является пенная флотация. Выполнены исследования по выявлению влияния различных параметров на результат процесса разделения.

Ключевые слова: пластмасса, рециклинг, флотация, смачиваемость.

“Development of methods for flotation separation of polymer mixtures”

Kovaleva A.A., Kulevets P.S., Levdanski A.E.

Current issues of chemical processing of plastic waste are considered. It has been revealed that in the field of mechanical processing of plastic waste, the issue of their sorting is acute. The most promising method for separating plastic mixtures is froth flotation. Studies have been carried out to identify various parameters of the separation result.

Key words: plastics, processing, flotation, wettability.

Одним из наиболее негативных результатов деятельности человека является образование отходов, среди которых отходы пластмасс занимают особое место в силу своих уникальных свойств.

Производство пластических масс на современном этапе развития возрастает в среднем на 4-5% ежегодно [1]. Насчитывается около 150 видов пластиков [2]. Со временем потребляемые пластики неизбежно переходят в отходы. Проблема переработки отходов полимерных материалов обретает актуальное значение не только с позиций охраны окружающей среды, но и связана с тем, что в условиях дефицита полимерного сырья пластмассовые отходы становятся мощным сырьевым и энергетическим ресурсом.

В мире предлагаются и разрабатываются различные стратегии вторичной переработки. В настоящее время наибольший прогресс достигнут в механической, термической и термохимической (пиролиз, газификация, гидролиз, гликолиз, метанолиз) переработке и в получении энергии.

На наш взгляд наиболее перспективной является механическая переработка. Метод механического рециклинга позволяет использовать переработанный материал как вторичное сырьё или же смешивать с чистым пластиком для получения нового материала [3].

Достоинства этого метода — это сравнительная простота технологии, а также универсальность, поскольку он применим для любых видов пластика. При механическом рециклинге не происходит выброса вредных веществ и испарения.

Недостатками механического рециклинга считаются энергоёмкость процесса, сложность регулирования размеров измельчения, ограниченное повторное применение материалов [4]. Кроме того, необходимо сортировать, разделять и очищать пластиковые изделия, что значительно замедляет процесс переработки.

Существуют различные способы сортировки и идентификации пластмасс, такие как воздушная сортировка, флотация, осаждение, пенная флотация, селективное растворение, инфракрасная спектроскопия, рентгеновский анализ, способ глубокого охлаждения, электростатические, химические способы и др. [5].

Из всех полимерных отходов механической переработке подвергается только незначительная их часть из-за трудностей, связанных с разделением смешанных отходов. Поскольку пластмассы, входящие в состав мусора, часто несовместимы. Переработка полимерных примесей приводит к ухудшению внешнего вида деталей, получаемых из отходов, снижению качества поверхности и физико-механических показателей. Поэтому требуется их почти полное разделение.

Из множества способов разделения пластмассовых отходов ни один не удовлетворяет всем требованиям (по достаточной скорости разделения, по стоимости, универсальности для различных полимеров и т. д.). Перспективными процессами разделения являются флотационные на основе различной смачиваемости, поскольку довольно просты аппаратно и надежны. Процесс флотации близок к процессу седиментации во флотационных ваннах, который широко используется в промышленных масштабах. Но флотационный процесс может позволить осуществлять разделение пластмасс с довольно близкими или равными плотностями.

Флотационные процессы крайне редко применяются для разделения измельченных пластмасс. В Республике Беларусь такие процессы не осуществляются вовсе. Любые данные о влиянии каких-либо факторов на флотационное разделение смесей измельченных пластмасс, которые могут быть полезны как с научной, так и с практической точки зрения, не встречаются в литературе.

Основаны флотационные процессы на различной смачиваемости разделяемых твердых частиц. Природу твердой поверхности можно изменить и превратить гидрофильную поверхность в гидрофобную (процесс гидрофобизации) и, наоборот, гидрофобную поверхность можно превратить в гидрофильную (процесс гидрофилизации). Для этого на твердой поверхности надо создать адсорбционный слой поверхностно-активного вещества (ПАВ).

Молекулы ПАВ, адсорбируясь на твердой поверхности согласно правилу Ребендера: полярные группы молекул ПАВ обращены к поверхности твердого тела, а углеводородные цепи в воздух. На поверхности образуется ориентированный адсорбционный нанослой из молекул ПАВ.

Адсорбция ПАВ на различных границах раздела фаз приводит к изменению величин межфазных энергий. Соответственно, с помощью ПАВ можно регулировать условия смачивания и величины краевых углов.

При смачивании гидрофобных поверхностей водными растворами ПАВ происходит адсорбция ПАВ на границах водный раствор/воздух и раствор/твердое тело; величины удельных энергий поверхностных натяжений $\sigma_{жг}$ и $\sigma_{тж}$ снижаются. В соответствии с уравнением Юнга при этом увеличиваются значения $\cos\theta$ (краевые углы уменьшаются). При снижении величин $\sigma_{тж}$ до значений, меньших $\sigma_{тг}$, $\cos\theta$ меняет знак, происходит инверсия смачивания: гидрофобные поверхности становятся гидрофильными.

Нами была разработана и изготовлена оригинальная компактная экспериментальная установка для определения угла смачиваемости на поверхности исследуемых образцов полимерных материалов. Наличие этой установки позволило нам провести огромное количество экспериментов по изучению влияния концентрации растворов ПАВ на угол смачивания.

При исследовании смачивания поверхности пластмасс использовали следующие виды ПАВ [6–7]:

- setacin 103 (лаурет-3 сульфосукцинат натрия) – динатриевая соль лауретсульфосукцината является хорошим эмульгатором, пенорегулятором и стабилизатором эмульсий. Обладает отличной очищающей способностью, улучшающей качество других, более агрессивных компонентов. Комбинируется с анионными, неионными и амфотерными ПАВами. Лауретсульфосукцинат динатриевая соль используется в косметических продуктах, особенно в мягких шампунях, гелях для душа, жидкого мыла и т.д.;

- лаурилсаркозинат натрия – поверхностно-активное вещество, представляющее собой амфифильное вещество, применяющееся в качестве пенообразующего при производстве моющих средств, зубной пасты, косметики;

- кокамидопропилбетаин (Cocamidopropyl Betaine) – амфотерное поверхностно-активное вещество, полученное из кокосового масла и диметиламинопропиламина. Представляет собой прозрачную или слегка мутную жидкость желтоватого цвета со слабым характерным запахом;

- lutensol 7 АО представляет собой неионогенные ПАВ со степенью этоксилирования 7 и длиной углеродной цепи $C_{13}C_{15}$. Синтезируется на базе синтетических спиртов, что позволяет достигать на выходе продуктов высокого качества без запаха и минимальным разбросом по Гауссу (минимальное содержание соседних по уровню этоксилирования продуктов). Lutensol 7 АО нашел широкое применение в бытовой химии, например порошках и гелях для стирки, так как имеет низкие показатели точки помутнения ($\sim 43\text{ }^{\circ}\text{C/A}$);

- полисорбат 80 – неионогенное синтетическое поверхностно-активное вещество. Полисорбат 80 – вязкая жидкость желтого цвета. Он хорошо растворяется в воде (смешивается с водой). В пищевой промышленности полисорбат 80 используется в качестве эмульгатора и стабилизатора,

также может использоваться для стабилизации пены (как пенообразователем, так и пеногасителем) и диспергирующим агентом;

– цетеарет-20 – неионогенное поверхностно-активное вещество, эмульгатор синтетического происхождения. Представляет собой пластинки или гранулы от белого до бежевого цвета. Часто применяется с целью создания кремов и эмульсий в косметике;

– диэтаноламид жирных кислот кокосового масла (ROKAMID KAD) – неионогенное поверхностно-активное вещество, производится на основе натуральных растительных масел (диэтаноламиды жирных кислот). Применяется в рецептурах пеномоющих косметических средств в качестве функционального ПАВ, отвечающего за загущение, стабилизацию пены, солюбилизацию отдушек и эфирных масел, а также предотвращение образования статистического электрического заряда волос. Имеет вид прозрачной или слегка мутной жидкости от светло-желтого до желтого цвета.

Суть экспериментов заключалась в том, что на поверхность пластмассового образца, предварительно обезжиренную этиловым спиртом, при помощи пипет-дозатора наносили капли дистиллированной воды и растворов ПАВ с концентрациями 0,05; 0,1; 0,5 и 1 г/дм³ объемом 5–10 мкл.

На рисунках 1 и 2 представлены зависимости изменения краевого угла смачивания исследуемых полимеров от концентрации растворов анионных ПАВ setacin 103 и лаурилсарказината натрия, соответственно.

Исходя из полученных зависимостей видно, что влияние растворов setacin 103 на смачиваемость поверхности исследуемых пластмасс выше, чем растворов лаурилсаркозината натрия. При концентрации раствора setacin 103 – 0,05 г/дм³ краевой угол смачивания всех исследуемых пластмасс составляет 27–35 град., в то время как при этой концентрации раствора лаурилсарказината натрия краевой угол смачивания составляет 57–77 град. Стоит также отметить, что полная смачиваемость (краевой угол смачивания равен 0 град.) полиамида достигается при концентрации раствора setacin 103 – 0,01 г/дм, а лаурилсарказината натрия – 0,5 г/дм³.

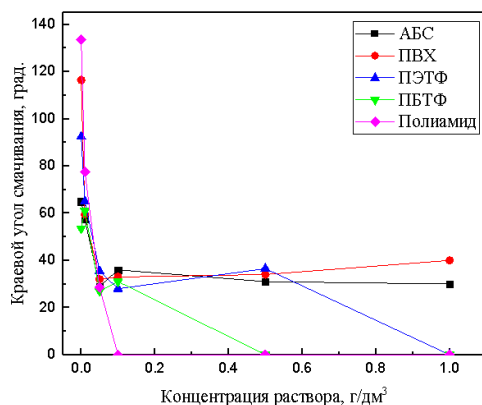


Рисунок 1 – Зависимость краевого угла смачивания исследуемых пластмасс от концентрации растворов ПАВ Setacin 103

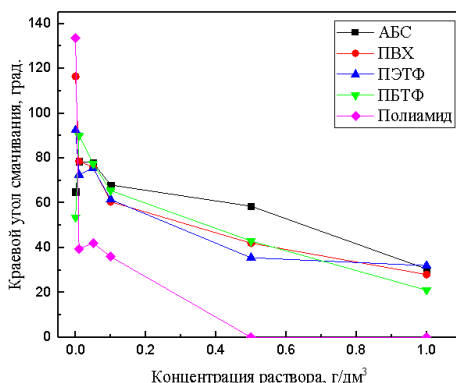


Рисунок 2 – Зависимость краевого угла смачивания исследуемых пластмасс от концентрации растворов ПАВ лаурилсарказината натрия

На рисунке 3 представлены зависимости изменения краевого угла смачивания исследуемых полимеров от концентрации раствора амфотерного ПАВ кокамидопропилбенитоина.

Из полученной зависимости видно, что растворы исследуемого амфотерного ПАВ проявляют смачивающую способность при концентрации $0,05 \text{ г/дм}^3$ и краевой угол смачивания рассматриваемых полимеров находится в диапазоне 45–65 град. Раствор кокамидопропилбенитоина с концентрацией 1 г/дм^3 обеспечивают полную смачиваемость поверхности (краевой угол смачивания равен 0 град.) полиамида, что дает возможность предположить выделение полиамида методом пенной флотации.

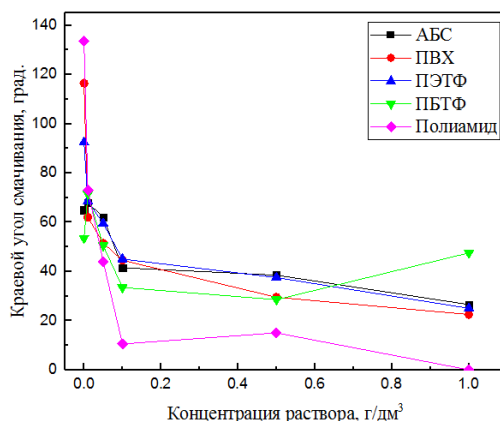


Рисунок 3 – Зависимость краевого угла смачивания исследуемых пластмасс от концентрации растворов ПАВ кокамидопропилбенитоина

Далее было исследовано влияние концентрации неионогенных поверхностно-активных веществ на краевой угол смачивания полимеров. На рисунке 4 представлены зависимости изменения краевого угла смачивания исследуемых полимеров от концентрации раствора лютенсон АО7.

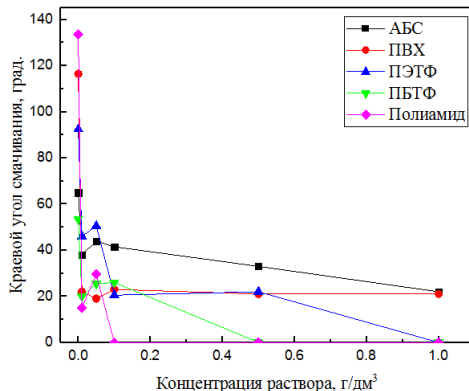


Рисунок 4 – Зависимость краевого угла смачивания исследуемых пластмасс от концентрации растворов ПАВ лютенсон АО7

Из представленных зависимостей видно, что растворы лютенсон АО7 проявляют смачивающую способность при концентрации $0,005 \text{ г/дм}^3$ и краевой угол смачивания рассматриваемых полимеров находится в диапазоне 19–50 град. Дальнейшее увеличение концентрации увеличивает смачиваемость исследуемых полимеров, т.е. краевой угол смачивается стремиться к нулю. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что данное поверхностно-активное вещество не пригодно для использования в качестве реагента в пенной флотации разделения данной группы полимеров на отдельные виды.

Из представленных зависимостей на рисунке 5 видно, что смачивающая способность растворов рокамида высокая даже при концентрации $0,05 \text{ г/дм}^3$. Краевой угол смачивания АБС-пластика при концентрации раствора $0,05 \text{ г/дм}^3$ составляет 25 град., с увеличением концентрации краевой угол возрастает. Данная зависимость дает основание предположить возможность извлечение АБС-

пластик в качестве концентрата из исследуемой смеси пенной флотации при использовании в качестве рабочей среды – раствора рокамида с концентрацией 1 г/дм³.

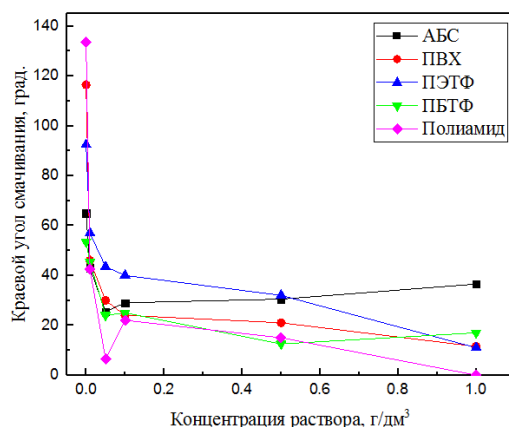


Рисунок 5 – Зависимость краевого угла смачивания исследуемых пластмасс от концентрации растворов ПАВ рокамида

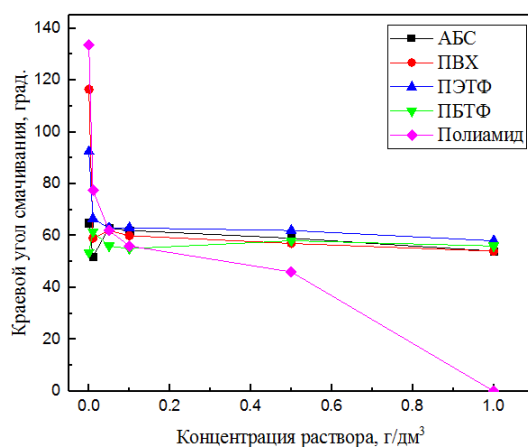


Рисунок 6 – Зависимость краевого угла смачивания исследуемых пластмасс от концентрации растворов ПАВ цетеарета 23

Смачиваемость полимеров растворами цетеарета 23 с увеличением концентрации практически не изменяется и находится в диапазоне 50–63 град. Однако, при концентрации 0,5 г/дм³ краевой угол смачивания полиамида снижается до 43 град, а при концентрации раствора 1 г/дм³ достигается полное смачивание полимера. Таким образом, полученные результаты предполагают извлечение полиамида из указанной смеси полимеров методом пенной флотации при использовании в качестве рабочего раствора ПАВ – цетеарет 23 с концентрацией 1 г/дм³.

Растворы неионогенного ПАВ – полисорбат 80 (рисунок 7) проявляют смачивающую способность при концентрации 0,05 г/дм³ и краевой угол смачивания исследуемых полимеров находится в диапазоне 51–72 град. Однако, раствор полисорбата 80 с концентрацией 0,5 г/дм³ обеспечивает полную смачиваемость (краевой угол смачивания равен 0 град.) поверхности полиамида.

На основе явления смачиваемости поверхности можно предположить, что при использовании раствора неионогенного поверхностно-активного вещества полисорбат 80 с концентрацией 0,5 г/дм³ можно выделить из исследуемой смеси полимеров (АБС-пластик, ПВХ, ПЭТФ, ПБТФ и ПА) полиамид методом пенной флотации. Также можно предположить, что на второй ступени флотационного процесса можно выделить в качестве концентрата ПБТФ из смеси (АБС-пластик, ПВХ, ПЭТФ, ПБТФ) при концентрации полисорбата 80 с концентрацией 1 г/дм³.

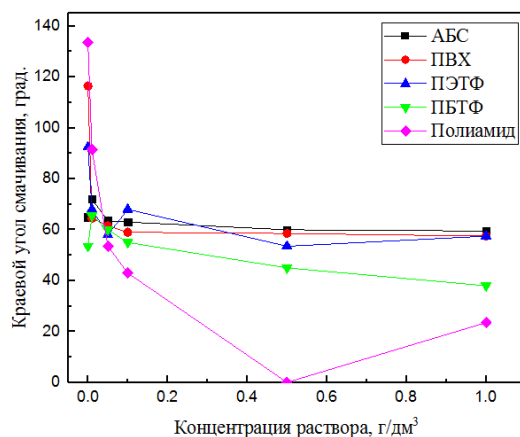


Рисунок 7 – Зависимость краевого угла смачивания исследуемых пластмасс от концентрации растворов ПАВ полисорбата 80

Полученные зависимости дают возможность предположить выделение отдельных групп полимеров из смеси пластмасс методом пенной флотации с высокой вероятностью, но для этого требуются дополнительные экспериментальные исследования.

Для проведения исследований по флотационному разделению полимерных смесей нами была разработана флотационная установка периодического действия с пневматической аэрацией.

На рисунке 8 представлена схема флотационной колонны с пневматической аэрацией.

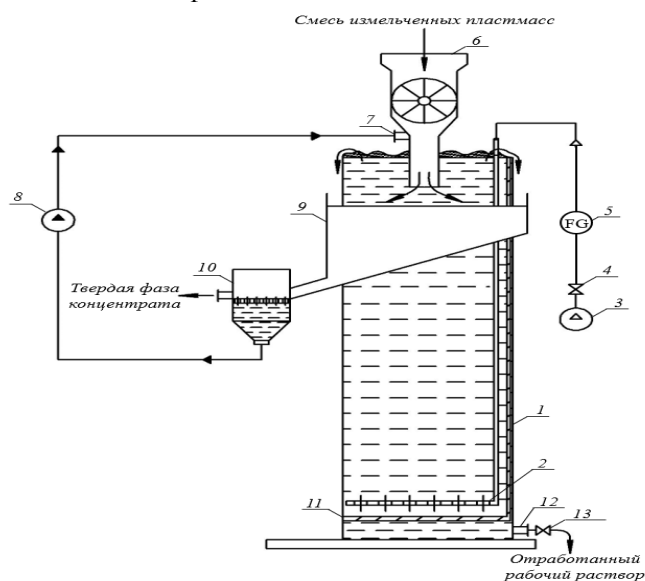


Рисунок 8 – Схема флотационной колонны с пневматической аэрацией: 1 – колонна; 2 – спиралевидный аэратор; 3 – компрессор; 4 – вентиль для подачи воздуха; 5 – ротаметр; 6 – ячейковый питатель; 7 – патрубок подачи рабочего раствора; 8 – насос; 9 – сливной желоб; 10 – сепаратор концентрата; 11 – съемная решетка; 12 – патрубок слива отработанного рабочего раствора; 13 – вентиль для слива отработанного рабочего раствора

Лабораторная флотационная установка состоит из колонны 1, выполненной из прозрачного оргстекла для более детального наблюдения за протеканием процесса. Равномерное распределение пузырьков воздуха в поперечном сечении колонны осуществляли с помощью спиралевидного аэратора 2 расположенного в нижней части (диаметр отверстий 0,33 мм и шаг 2,5–3,0 см) с возможностью регулирования высоты столба рабочего раствора для определения ее оптимального значения. С помощью вентиль 4 и ротаметра 5 устанавливали необходимый расход воздуха, который подавался из компрессора 3 в аэратор 2. Смесь пластмасс загружали через ячейковый питатель 6, расположенный в верхней части колонны. Глубина погружения патрубка питателя в раствор составляла $(3 \pm 0,5)$ см. Для отвода пенного концентрата методом слива предусмотрена

постоянная циркуляция рабочего раствора. С целью предотвращения накопления частиц пластмасс в питателе рабочий раствор возвращался в колонну через патрубок 7 с помощью насоса 8. Пенный продукт по сливному желобу 9 поступал в сепаратор 10, в котором происходит разделение твердой фракции концентрата и рабочего раствора. Сепаратор 10 выполнял также роль накопителя рабочего раствора, необходимого для постоянной циркуляции. Опустошение колонны осуществляется через патрубок 12 и вентиль 13. Гидрофильные частицы пластмасс (остаток) в процессе флотационного разделения оседали на съемную решетку 11, которая извлекается после опустошения колонны [9].

При проведении экспериментов установка эксплуатировалась в периодическом режиме окончанием процесса разделения смеси считали тот момент времени, в который частицы пластмасс в объеме рабочего раствора не наблюдались. Полученные фракции концентрата и остатка были промыты водой и высушены. Далее для определения доли каждого типа пластмасс в концентрате и остатке выполнялась ручная сортировка по цвету и проводилось взвешивание.

Поверхность частиц, обладающая гидрофобными свойствами, формировала при подаче воздуха комплексы «пузырек – частица» с фиктивной плотностью меньше, чем плотность рабочего раствора, что способствует их всплытию на поверхность раствора под действием силы Архимеда. Поверхность частиц, проявляющая гидрофильные свойства, полностью смачивалась рабочим раствором, и частицы оседали на съемную решетку под действием силы тяжести.

Расчет степени извлечения (ε) и чистоты концентрата (β) флотируемого компонента проводили по формулам [1]:

$$\varepsilon = \frac{m_{\text{конц}}^{\text{фл}}}{m_{\text{исх}}^{\text{фл}}} \cdot 100\%;$$

$$\beta = \frac{m_{\text{конц}}^{\text{фл}}}{m_{\text{конц}}} \cdot 100\%.$$
(1)

где $m_{\text{конц}}^{\text{фл}}$ – масса извлекаемого пластика в концентрате, кг;

$m_{\text{исх}}^{\text{фл}}$ – масса извлекаемого пластика, поданного на флотацию, кг;

$m_{\text{конц}}$ – масса концентрата, кг.

На рисунках 9–12 представлены результаты флотационного извлечения ПБТ, ПС, ПА6 и АБС в зависимости от природы применяемого ПАВ и его концентрации в рабочем растворе. Флотационное извлечение исследуемых пластмасс проводили при расходе воздуха $2,2 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ ч})$ [10], который обеспечивает удовлетворительное количество образовавшихся пузырьков газа в рабочем растворе для эффективного флотационного разделения и минимизирует вероятность возникновения локальных турбулентных потоков во флотационной камере; температуре рабочего раствора $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ [10], которая оказывает влияние на физико-химические свойства поверхности пластмасс и, следовательно, на его способность контактировать с пузырьками воздуха [11–14]; высоте столба рабочего раствора 70 см [10], которая обеспечивает высокую вероятность контакта частицы с пузырьком и минимизировать вероятность разрушения комплекса «пузырек – частица» [15].

По данным, представленным на рисунке 9, установлено, что поверхность частиц полистирола проявляла гидрофобные свойства к рабочим растворам лаурет-3 сульфосукцинат натрия в диапазоне концентраций от $1,98 \cdot 10^{-3} \text{ г/дм}^3$ до $9,72 \cdot 10^{-3} \text{ г/дм}^3$ и эффективность флотационного извлечения в концентрат составляло 86,5–96 %. С увеличением концентрации лаурет-3 сульфосукцинат натрия в рабочем растворе от $1,98 \cdot 10^{-3} \text{ г/дм}^3$ до $9,72 \cdot 10^{-3} \text{ г/дм}^3$ возрастала степень гидрофобности поверхности частиц ПА6. Эффективность извлечения частиц ПА6 в концентрат увеличилась от 28,5 % до 83 %. Зависимость степени извлечения ПБТ имеет перегиб при концентрации раствора $5,89 \cdot 10^{-3} \text{ г/дм}^3$ и степень извлечения составляет 33 %, дальнейшее увеличение концентрации рабочего раствора до $9,72 \cdot 10^{-3} \text{ г/дм}^3$ приводит к возрастанию степени извлечения до 72 %. При концентрации лаурет-3 сульфосукцинат натрия в рабочем растворе $1,98 \cdot 10^{-3} \text{ г/дм}^3$ степень извлечения АБС составила 32 %, при увеличении концентрации от $3,88 \cdot 10^{-3} \text{ г/дм}^3$ до $5,89 \cdot 10^{-3} \text{ г/дм}^3$ степень извлечения резко возросла до 93,4 %. Дальнейший рост

концентрации лаурет-3 сульфосукцинат натрия в рабочем растворе до $9,72 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ степень извлечения АБС составляла 82,5 %.

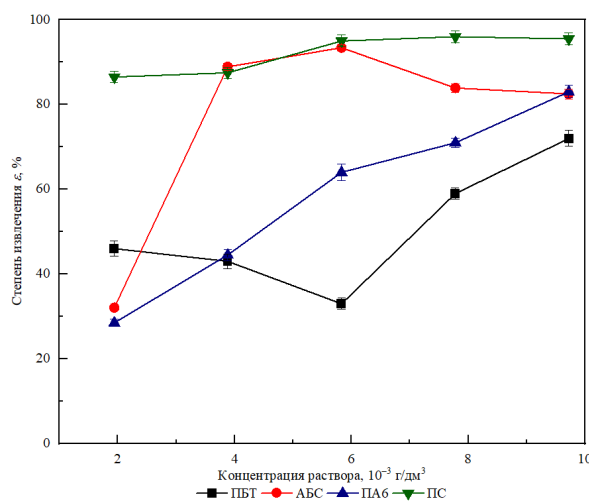


Рисунок 9 – Зависимости степени извлечения исследуемых пластмасс от концентрации лаурет-3 сульфосукцинат натрия в рабочих растворах

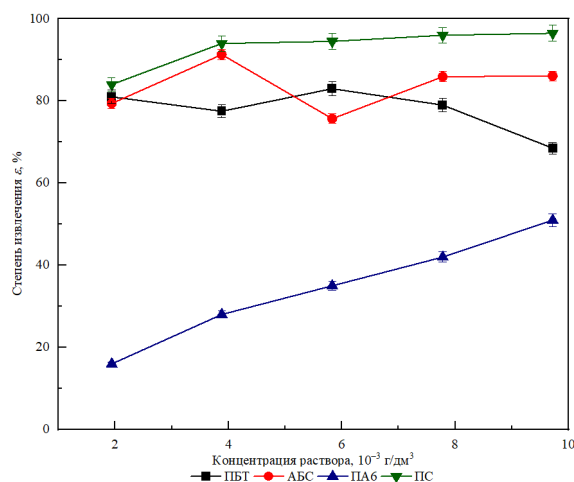


Рисунок 10 – Зависимости степени извлечения исследуемых пластмасс от концентрации лаурил саркозинат натрия в рабочих растворах

Из зависимостей степени извлечения исследуемых пластмасс от концентрации лаурил саркозинат натрия в рабочих растворах, представленных на рисунке 10 видно, что эффективность флотационного извлечения ПБС составляла 68,5–81 % при всех исследуемых концентрациях лаурил саркозинат натрия в рабочем растворе. Зависимость степени извлечения АБС в концентрат в рабочих растворах с концентрацией лаурил саркозинат натрия от $1,98 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ до $9,72 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ имела скачкообразный характер и эффективность извлечения находилась в диапазоне 79,4–91,3 %. Степень извлечения ПА6 в концентрат плавно возрастала от 16 % до 51 % с увеличением концентрации лаурил саркозинат натрия в рабочем растворе от $1,98 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ до $9,72 \cdot 10^{-3}$ г/дм³. Поверхность частиц ПС проявляла гидрофобные свойства к рабочим растворам лаурил саркозинат натрия в диапазоне исследуемых концентраций и степень извлечения ПС в концентрат составляла 84–96,5 %.

Степень извлечения АБС в концентрат из рабочих растворов полисорбата 80 с концентрацией от $1,94 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ до $3,88 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ снижалась с 88 % до 68,4 %, при концентрации $5,89 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ – составила 79,6 %. Дальнейшее увеличение концентрации полисорбата 80 в рабочем растворе до $9,72 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ степень извлечения АБС снизилась до 63,6 %. При увеличении концентрации рабочего раствора с $1,94 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ до $3,88 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ степень извлечения ПА6 резко возросла в два раза. При дальнейшем увеличении концентрации полисорбата 80 до $9,72 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ эффективность

извлечения ПА6 достигла 79 %. Степень извлечения ПБТ возрастает с 21,5 % до 76,5 % с увеличением концентрации полисорбата 80 в рабочих растворах от $3,88 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ до $5,89 \cdot 10^{-3}$ г/дм³. При дальнейшем увеличении концентрации полисорбата 80 до $9,72 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ степень извлечения ПБТ снизилась до 58 %. Эффективность извлечения ПС при всех исследуемых концентрациях полисорбата 80 находилась в диапазоне 90–98 %.

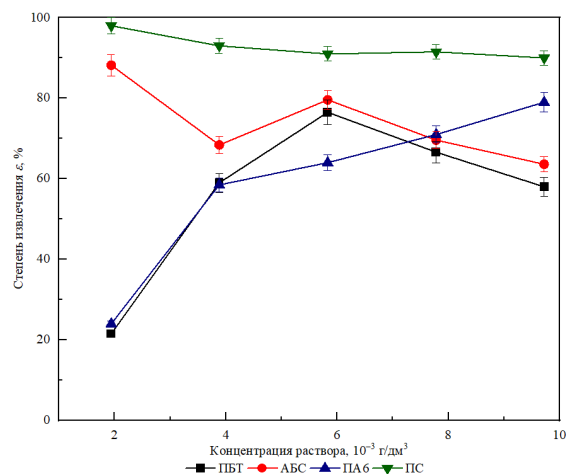


Рисунок 11 – Зависимости степени извлечения исследуемых пластмасс от концентрации полисорбата 80 в рабочих растворах

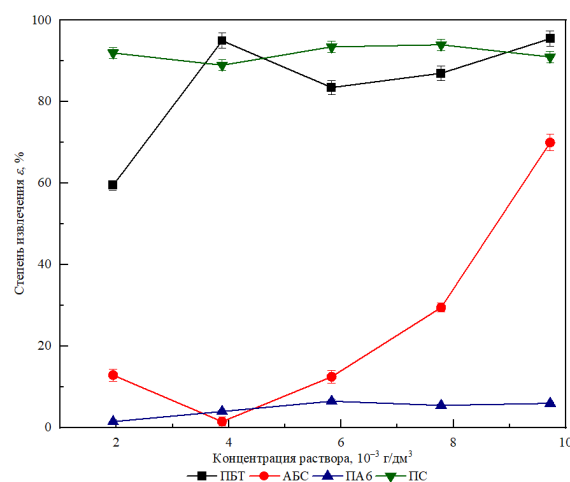


Рисунок 12 – Зависимости степени извлечения исследуемых пластмасс от концентрации алкилполиглюкозида C8-C14 в рабочих растворах

По зависимости степени извлечения ПА6 (рисунок 12) видно, что поверхность частиц проявляла гидрофильные свойства по отношению к рабочим растворам алкилполиглюкозида, т.е. частицы полностью смачивались раствором и под действием силы тяжести оседали на дно колонны. Эффективность извлечения достигала 6,5 %. Поверхность частиц ПС проявляла гидрофобные свойства по отношению к рабочим растворам алкилполиглюкозида. Эффективность извлечения ПС при всех исследуемых концентрациях находилась в диапазоне 89–94 %. Степень извлечения ПБТ при концентрации алкилполиглюкозида в рабочем растворе $3,88 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ достигала 95 %. При увеличении концентрации рабочего раствора до $9,72 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ степень извлечения ПБТ составляла 83,5–95,5 %. Степень извлечения АБС была минимальной около 1,5 % при концентрации алкилполиглюкозида в рабочем растворе $3,88 \cdot 10^{-3}$ г/дм³. При дальнейшем увеличении концентрации алкилполиглюкозида в рабочем растворе до $9,72 \cdot 10^{-3}$ г/дм³ степень извлечения АБС достигала 70 %.

Полученные нами результаты показывают, что при проведении ряда дополнительных исследований возможно при простом аппаратном оформлении и малых расходах ПАВ и воздуха

создание высокопроизводительного и автоматизированного процесса сортировки полимерных отходов.

Список литературы

1. Мировая индустрия пластмасс: тенденции и перспективы [Электронный ресурс]. – Москва, 2021. – Режим доступа: <https://marketpublishers.ru/lists/12153/news.html>. – Дата доступа: 20.10.2021.
2. Володина Д.А., Азарова С.В., Перегудина Е.В. Рециклинг отходов пластмасс. «Молодой учёный». – № 11 (91) Экология, 2015 г. – С. 535-536.
3. Ишалина О.В., Лакеев С.Н., Миннигулов Р.З., Майдано-ва И.О. Анализ методов переработки отходов полиэтилентерефталата // Промышленное производство и использование эластомеров. – 2015. – № 3. – С. 39–48.
4. Петров А. В., Дориомедов М.С., Скрипачев С.Ю. Технологии ути-лизации полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды Виам. – 2015. – № 8. – С. 62–73.
5. Левданский А.Э., Опимах Е.В., Волненко А.А., Корганбаев Б.Н., Жумадуллаев Д.К. Флотационное разделение смеси измельченных полимерных отходов [Текст]: монография. – Шымкент: Типография «Элем», 2020. – 152 с.
6. Поверхностно-активные вещества. – <https://neftegaz.ru/tech-library/neftekhimiya/141454-poverkhnostno-aktivnye-veshchestva/> (дата обращения: 17.11.2022).
7. Поверхностно-активные вещества. – <https://belpharm-mb.by/applying/kosmetika/poverkhnostno-aktivnye-veshchestva/> (дата обращения 17.11.2022).
8. Абрамов А.А. Флотационные методы обогащения: Учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство «Горная книга», 2016. – 595 с.
9. Ковалева А.А., Кулевец П.С., Левданский А.Э. Исследование факторов, влияющих на процесс флотационного разделения смеси полибутилентерефталата и акрилонитрилбутадиенстирола // Труды БГТУ: Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2023. – № 2 (271). – С. 35–41.
10. Заявка ВУ, а 20220321, 2021.
11. Опимах Е. В., Левданский А. Э. Разделение смеси измельченных акрилонитрилбутадиенстирола и полиамида методом флотации с использованием в качестве поверхностно-активных веществ сульфанола и синтанола // Труды БГТУ: Химия и технология неорганических веществ. – 2013. – № 3(159) – С. 179–181.
12. Drelich J., Kim J. H., Payne T., Miller J. D., Kobler R. W. Purification of polyethylene terephthalate from polyvinyl chloride by froth flotation for the plastics (soft-drink bottle) recycling industry // Separation and Purification Technology. – 1999. – Vol. 15, no. 1. – P. 9–17.
13. Левданский А.Э., Опимах Е.В., Волненко А.А., Жумадуллаев Д.К. Изучение влияния расхода воздуха, высоты слоя жидкости и температуры на процесс флотационной сепарации молотых пластиков // Известия НАН РК. Серия химия и технологии. – 2020. – № 3. – С. 36–43.
14. Wang C., Li H. A. Stability and mobility of foam generated by gas-solvent/surfactant mixtures under reservoir conditions // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2016. – Vol. 34. – P. 366–375.
15. Ковалева А. А., Кулевец П. С., Левданский А. Э. Влияние высоты столба рабочего раствора на флотационное разделение смеси полимерных отходов // Материалы XV юбилейной международной научно-технической конференции «Техника и технология пищевых производств», Могилев 19–20 апреля 2023 г. – 2023. – Т. 1. – С. 280–281.

УДК 66-5

Маслова В.В., Нестерова А.В., Титов А.А., Ильина С.И., Равичев Л.В.

К изучению влияния различных параметров на электродиализное разделение

Маслова Василиса Владимировна – студент; vasilisamaslova14@mail.ru.

Нестерова Алиса Витальевна – студент;

Титов Алексей Алексеевич – аспирант;

Ильина Светлана Игоревна – к.т.н., доцент кафедры ПАХТ;

Равичев Леонид Владимирович – д.т.н., заведующий кафедрой ПАХТ.

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

Электродиализ представляет собой перспективный мембранный процесс разделения, широко применяемый в водоподготовке, извлечении ценных компонентов и различных промышленных процессах. В данной статье рассматривается влияние токовых режимов и гидродинамических параметров на массоперенос в процессе электродиализа, с акцентом на существование граничных условий, определяющих эффективность процесса. На основе анализа экспериментальных данных и теоретических моделей предложены новые подходы к оптимизации протекания электродиализа и расширению его применения в различных отраслях. Особое внимание уделяется взаимосвязи между скоростью потока, плотностью тока и концентрационной поляризацией в электродиализной системе, что открывает возможности для создания более эффективных и экологически устойчивых процессов разделения.

Ключевые слова: электродиализ, токовые режимы, гидродинамические параметры, массоперенос, граничные условия, концентрационная поляризация.

To study the influence of various parameters on electrodialysis separation

Maslova V.V., Nesterova A.V., Titov A.A., Ilyina S.I., Ravichev L.V.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

Electrodialysis is a promising membrane separation technology for water treatment, resource recovery, and various industrial applications. This article explores the influence of hydrodynamic parameters and current regimes on mass transfer during electrodialysis, focusing on understanding the boundary conditions that govern the process. By analyzing experimental data and theoretical models, we aim to provide insights into optimizing electrodialysis performance and expanding its application in diverse fields. The research emphasizes the critical relationship between flow rates, current density, and concentration polarization within the electrodialysis system, offering a pathway towards more efficient and sustainable separation processes.

Keywords: Electrodialysis, hydrodynamic parameters, current regimes, mass transfer, boundary conditions, concentration polarization

Введение

Современная промышленность сталкивается с необходимостью разработки энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий. Мембранные процессы разделения, особенно электродиализ, а также его разновидности: электродеионизация и биполярный электродиализ, стали одними из наиболее перспективных решений этих задач. Электродиализное разделение может решить проблему извлечения ионов из растворов, получения чистых кислот и щелочей, концентрирования растворов без изменения агрегатного состояния и находит применение в различных отраслях, включая водоподготовку, химическую обработку и регенерацию ресурсов.

В отличие от других методов разделения, таких как обратный осмос или ионный обмен, электродиализ обладает рядом преимуществ, включая безреагентное получение деионизованной воды, малых объемов концентратов и возможность работы с растворами с высоким pH. Понимание факторов, влияющих на эффективность ЭД, имеет решающее значение для оптимизации его работы и расширения областей применения.

Теоретическая часть

Электродиализ (ЭД) основан на селективном переносе ионов через ионообменные мембраны под действием электрического поля. Электродиализный аппарат состоит из чередующихся анионообменных и катионообменных мембран, формирующих отдельные камеры для обессоливания и концентрирования. При подаче постоянного тока на аппарат, положительно заряженные ионы (катионы) мигрируют к катоду (отрицательному электроду) через катионообменные мембраны, а

отрицательно заряженные ионы (анионы) перемещаются к аноду (положительному электроду) через анионообменные мембраны. Этот селективный перенос приводит к разделению ионов из обессоливаемого потока и их накоплению в концентрируемом потоке.

В процессе электродиализа одновременно протекают несколько явлений, включая миграцию ионов под действием электрического поля, электроосмос, осмос и диффузию. Эти процессы в совокупности определяют сложные профили концентраций, наблюдаемые в ЭД-аппарате. Важно отметить, что эффективность электродиализа напрямую зависит от правильного подбора мембран, оптимизации гидродинамического режима и контроля токовых характеристик.

Факторы, влияющие на эффективность электродиализных процессов

Эффективность и результативность электродиализа определяются множеством факторов, которые можно разделить на следующие категории:

1. Гидродинамические параметры: скорость потоков обессоливаемого и концентрируемого растворов, геометрия каналов, наличие турбулизаторов потока.
2. Электрические параметры: плотность тока, напряжение, тип тока (постоянный, импульсный).
3. Свойства мембран: тип используемых ионообменных мембран, их числа переноса и сопротивление.
4. Химический состав раствора: концентрация и состав исходного раствора, pH, температура и ионная сила.

Стоит отметить, что категории «3» и «4» относятся к характеристикам системы, в то время как первые два пункта к условиям протекания процесса. Рассмотрим их более подробно.

Влияние гидродинамических параметров

Гидродинамические условия внутри электродиализного аппарата оказывают существенное влияние на массоперенос и концентрационную поляризацию. Скорость потока, обессоливаемого и концентрируемого растворов, влияет на время пребывания ионов в аппарате и толщину диффузионного слоя у поверхности мембран. Повышение скорости потока обычно снижает концентрационную поляризацию и увеличивает массоперенос, но также увеличивает энергопотребление процесса.

Использование турбулизаторов потока, таких как сетки или гофрированные мембраны, может улучшить перемешивание и снизить концентрационную поляризацию. Важно отметить, что оптимальная геометрия турбулизаторов должна подбираться индивидуально для каждого типа электродиализного аппарата.

Влияние токовых режимов

Плотность приложенного тока является ключевым параметром в электродиализе. При низких значениях плотности тока перенос ионов пропорционален приложенному току. Однако по мере увеличения плотности тока, у поверхности мембран развивается концентрационная поляризация. Это явление возникает, когда скорость переноса ионов превышает скорость их поступления из объема раствора.

Предельная плотность тока достигается, когда концентрация ионов у поверхности мембраны приближается к нулю. Превышение предельной плотности тока приводит к резкому увеличению электрического сопротивления и снижению эффективности по току вследствие расщепления воды.

Экспериментальная часть

Для изучения влияния токовых режимов на массоперенос в процессе электродиализа были проведены эксперименты с использованием многокамерной электродиализной ячейки с замкнутым контуром. Экспериментальная установка включала в себя:

- Электродиализный аппарат, типа фильтр-прессного с чередующимися катионообменными и анионообменными мембранами.
- Исходный раствор: водные растворы хлорида натрия (NaCl) различной концентрации.
- Насосы: для регулирования скорости потока, обессоливаемого и концентрируемого растворов.
- Источник питания: источник постоянного тока для создания электрического поля в аппарате.
- Измерительные приборы: вольтметры, амперметры и кондуктометры для контроля электрических параметров и концентрации растворов.

Эксперименты проводились при условии изменения скорости потока и концентрации исходного раствора при этом проводились измерения тока и напряжения. Полученные данные были проанализированы для определения взаимосвязи между гидродинамическими параметрами и

плотностью тока. Обработка полученных результатов представлена на рисунках 1 и 2 в виде графических зависимостей.

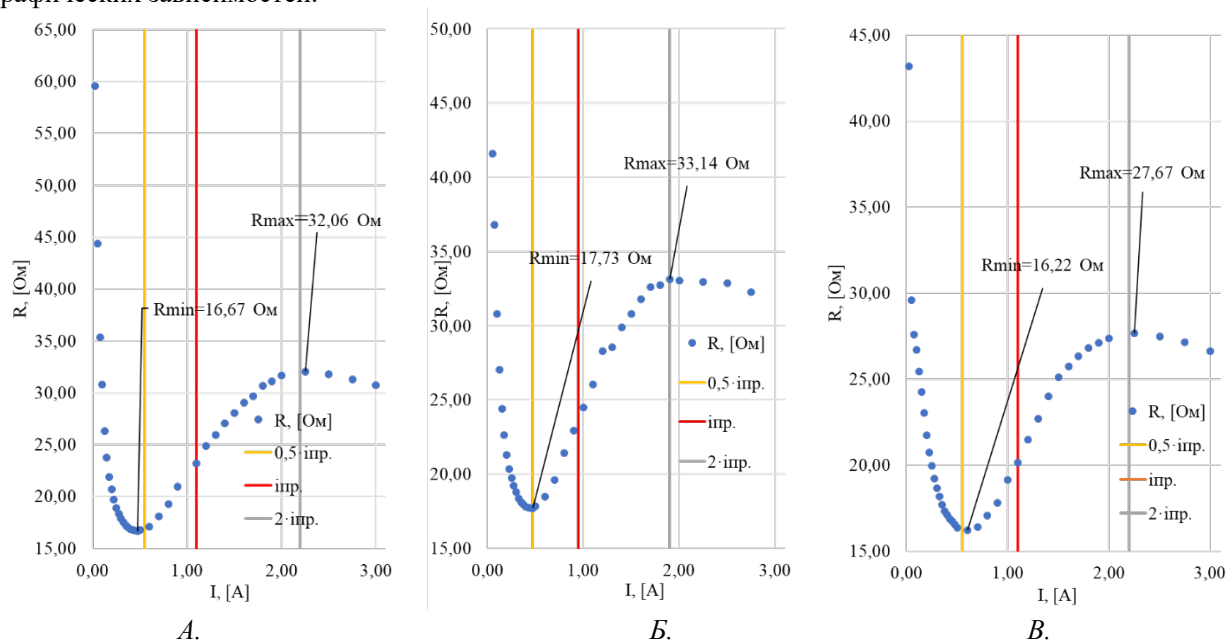


Рисунок 1 - Эксперимент при концентрации раствора NaCl 0,1 М и расходами:

А) по концентрату - 1,25 л/мин, по диллюату - 1,25 л/мин;

Б) по концентрату - 1,5 л/мин, по диллюату - 1,5 л/мин;

В) по концентрату - 2 л/мин, по диллюату - 0,5 л/мин;

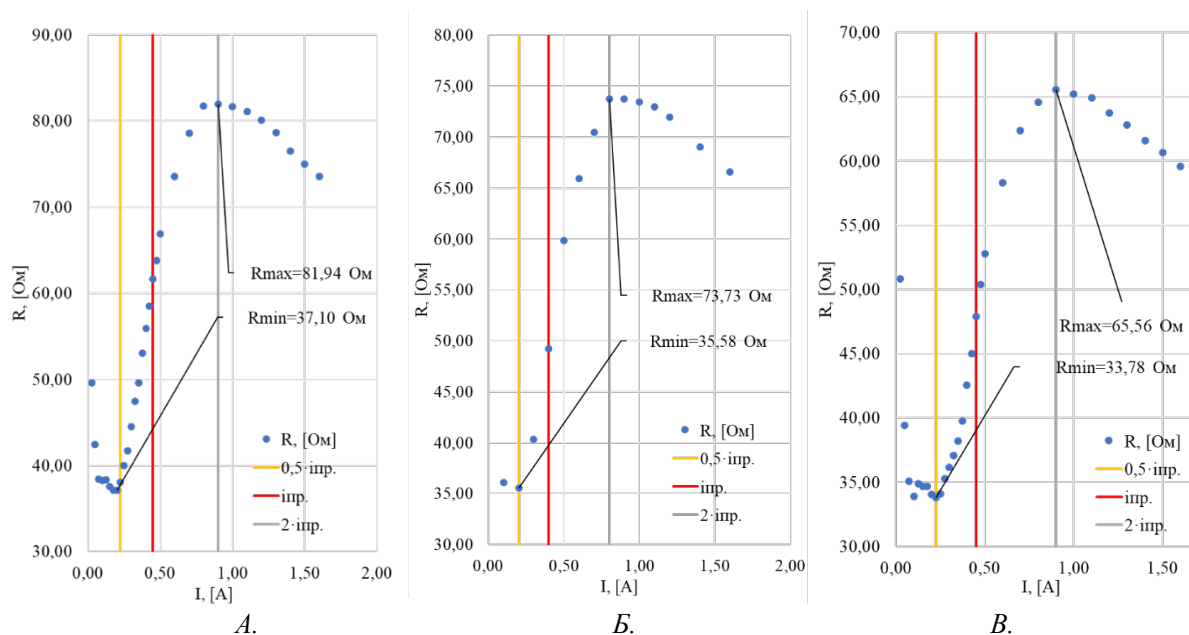


Рисунок 2 - Эксперимент при концентрации раствора NaCl 0,05 М и расходами:

А) по концентрату - 1,25 л/мин, по диллюату - 1,25 л/мин;

Б) по концентрату - 1,5 л/мин, по диллюату - 1,5 л/мин;

В) по концентрату - 2 л/мин, по диллюату - 0,5 л/мин;

Результаты и обсуждение

Экспериментальные результаты показали наличие тесной взаимосвязи между гидродинамическими параметрами и плотностью тока в процессе электродиализа. Увеличение

скорости потока, обессоливаемого и концентрируемого растворов, приводило к снижению концентрационной поляризации и увеличению предельной плотности тока соответственно.

На основании анализа полученных зависимостей можно сделать вывод, что граничными условиями протекания процесса электродиализного разделения являются:

$$i/i_{\text{пр}} \approx 0,5$$

$$i/i_{\text{пр}} \approx 1$$

$$i/i_{\text{пр}} \approx 2^*$$

Особый интерес представляет граничное условие $i/i_{\text{пр}} \approx 0,5$, которое не отмечено в базовой литературе по электродиализу [3]. Однако математическое моделирование, приведенное в работе [4], подтверждает данный факт.

Также из графических зависимостей определили предельную плотность тока для различных расходов при электродиализном разделении растворов NaCl 0,1 М и 0,05 М (таблица 1).

Таблица 1

Значение предельной плотности тока при различных расходах дилюата для раствора NaCl.

Расход по дилюату/концентрату, л/мин	$i_{\text{пр}}$	
	0,05М	0,1М
0,5/2	0,45	1,1
1,25/1,25	0,45	1,1
1,5/1,5	0,4	0,95

Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы: во-первых, вольтамперная характеристика электродиализа имеет четыре области, граничное условие перехода от первой ко второй области для раствора NaCl будет составлять 0,5, однако, следует уточнить это значение для растворов других соединений; во-вторых,

Список литературы

1. Ильина С. И. Процессы обессоливания и концентрирования в однопоточных электродиализаторах // Дис. канд. тех. наук: 05.17.08. Ильина С. И. - Москва, 2001.
2. Гребенюк, В.Д. Электродиализ / В.Д. Гребенюк. – Киев: Техника, 1976. – 160 с.
3. Гнусин Н. П. Моделирование электропереноса в электродиализной ячейке. Теор. основы хим.технол. 2004. Т. 38. № 3. С. 316-320.
4. https://kubsu.ru/sites/default/files/users/5036/portfolio/gorobchenko_a.d._tb_magistr_1_kurs_kurs_ovaya_rabota.pdf (дата обращения 13.03.2025).

УДК 66.081.6-278

Пак Д.Л., Рохманка Т.Н., Голубев Г.С., Грушевенко Е.А.

Первапорационное концентрирование биобутанола: разработка полиорганосилоксановых мембран с низкой поверхностной энергией

Пак Дарья Львовна – ст. лаборант; dashaisatid@yandex.ru.

Рохманка Татьяна Николаевна – м.н.с.;

Голубев Георгий Сергеевич – к.х.н., научный сотрудник;

Грушевенко Евгения Александровна – к.х.н., старший научный сотрудник;

ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени «Институт нефтехимического синтеза имени А. В. Топчиева» Российской академии наук, Россия, Москва, 119991, Ленинский проспект, 29.

В тезисах рассмотрена химическая модификация полидецилметилсилоксана путем введения 2,2,3,3,3-пентафторпропилакрилата (F5) в боковую цепь для создания мембран с улучшенными разделительными свойствами для извлечения n-бутанола из ферментационных смесей. Модифицированные мембраны с 50% мол. содержанием F5 (50F5/МФФК) продемонстрировали более низкую поверхностную энергию, более высокую проницаемость и улучшенную селективность по n-бутанолу. Кроме того, мембрана 50F5/МФФК, продемонстрировала превосходную устойчивость к загрязнениям, что обеспечит долгосрочную стабильность процесса непрерывного производства биоспиртов.

Ключевые слова: мембраны, первапорация, n-бутанол, фторакрилаты, полисилоксаны, биоспирты.

Pervaporation separation of biobutanol from fermentation broth with new antifouling polysiloxane membranes

Park D.L., Rokhmanka T.N., Golubev G.S., Grushevenko E.A.

Federal State Budgetary Institution of Science "A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis" of the Russian Academy of Sciences, 29 Leninsky Prospect, Moscow, 119991, Russia.

This thesis deals with the chemical modification of polydecylmethylsiloxane by introducing 2,2,3,3,3-pentafluoropropylacrylate (F5) into the side chain to create membranes with improved separation properties for the extraction of n-butanol from fermentation mixtures. The modified membranes with 50% mol. F5 content (50F5/MFFK) exhibited lower surface energy, higher permeability and improved selectivity for n-butanol. In addition, the 50F5/MFFK membrane showed excellent fouling resistance, which will ensure the long-term stability of the continuous biofuel production process.

Key words: membranes, pervaporation, n-butanol, fluoroacrylates, polysiloxanes, bioalcohols.

Введение

Производство биоспиртов является одним из подходов в развитии альтернативной энергетики. Наиболее ценным биоспиртом с точки зрения совместимости с двигателями внутреннего сгорания является 1-бутанол. Перспективным вариантом выделения биоспиртов из ферментационной смеси представляется первапорация (мембранный метод, применяемый для разделения бинарных и многокомпонентных жидких смесей с помощью сплошных мембран, в котором пермеат отводится в виде пара [1]). Данный метод характеризуется низкими энергозатратами, а также не требует расхода дополнительных реагентов и не оказывает вредных воздействий на микроорганизмы. Для первапорационного разделения ацетон-этанол-бутанол (АБЭ)-ферментационной смеси наиболее изученными являются мембраны с селективным слоем из полисилоксанов [2], ввиду их высокой проницаемости и эффективности при выделении бутанола [3]. Тем не менее, несмотря на эффективность первапорационного концентрирования биоспиртов, серьезной проблемой в процессе непрерывного извлечения биобутанола из ферментационной смеси является загрязнение мембраны, что приводит к снижению ее проницаемости. Ввиду чего помимо высокой селективности по бутанолу мембрана должна обладать устойчивостью к засорению поверхности. Решением проблемы засорения может служить химическая модификация полимера селективного слоя мембраны для создания устойчивой к образованию отложений поверхности [4]. Известно, что введение в полимеры фторсодержащих групп приводит к увеличению гидрофобности и липофобности [5] за счет снижения поверхностной энергии. Ранее было показано, что мембрана с селективным слоем из полидецилметилсилоксана (0F) обладает высокой селективностью по бутанолу при его выделении из АБЭ-ферментационной смеси [6]. Однако, в процессе первапорационного разделения транспортные характеристики мембраны ухудшались. В связи с этим в данной работе впервые исследована возможность введения 2,2,3,3,3-пентафторпропилакрилата (F5) в боковую цепь полиметилсилоксана

и создания сополимера с 0F с целью получения материала с хорошими разделительными свойствами при выделении н-бутанола из ферментационной смеси и устойчивостью к образованию осадка на поверхности селективного слоя.

Экспериментальная часть

Методом ^1H ЯМР спектроскопии показано практически количественное присоединение F5 и 1-децена к полиметилгидросилоксану (ПМГС). Полнота реакции гидросилилирования в сшитых пленках была подтверждена методом ИК-спектроскопии. В спектрах образцов не было обнаружено полос, соответствующих связям Si-H от модифицируемого ПМГС. С помощью поверхностного элементного анализа было показано, что в сополимерах наблюдается ориентация боковых F5 групп к поверхности пленки. Как следствие, это приводит к снижению поверхностной энергии пленок до значений 17-18 мДж/м², что близко к поверхностной энергии тефлоновых поверхностей (18-20 мДж/м²[7]). Показано, что введение фторакрилатных боковых заместителей в полисилоксан влияет на сорбцию отдельных жидкостей. Увеличение содержания F5 в сополимере приводит к увеличению объемной сорбции этанола и ацетона. Зависимость сорбции н-бутанола имеет экстремальный характер, причем максимум приходится на образец 50F5.

На основе сополимера 50F5, характеризующегося максимальным значением сорбции н-бутанола (0.36 г/г pol против 0.19 г/г pol для 0F) и минимальным значением поверхностной энергии (17 мДж/м² против 26 мДж/м² для 0F) в исследуемом ряду, а также 0F были получены композиционные мембраны на микрофильтрационной подложке МФФК-1. Для оценки транспортных и разделительных свойств композиционных мембран 50F5/МФФК и 0F/МФФК было произведено разделение дезактивированной АБЭ-ферментационной смеси в режиме вакуумной перапарации. Нормированный на толщину селективного слоя поток через мембрану составил 3.1 кг·м·10⁻⁶/м²·ч для 50F5/МФФК и 1.4 кг·м·10⁻⁶/м²·ч для 0F/МФФК. В сравнении с 0F введение фторакрилатных заместителей в боковую цепь полисилоксана не оказывает значительного влияния на фактор разделения. При этом достигается более высокая селективность выделения н-бутанола – 2 в случае 50F5/МФФК и 1.8 в случае 0F/МФФК.

Сравнительное исследование стабильности транспортных свойств мембран 50F5/МФФК и 0F/МФФК после 2 месяцев контакта с раствором АБЭ-ферментационной смеси показало, что наличие фторакрилатных групп в полимере селективного слоя позволяет практически полностью предотвратить относительное снижение проницаемости композиционной мембраны. Так, для мембраны 50F5/МФФК, снижение проницаемости CO₂ после контакта с данным загрязняющим агентом составило 1.46% (с 0.227 до 0.224 м³/(м²·ч·бар), соответственно). В то же время мембране 0F/МФФК, было характерно большее снижение газотранспортных свойств – проницаемость CO₂ снизилась на 40.91% (с 0.22 до 0.13 м³/(м²·ч·бар), соответственно) (таблица 1).

Таблица 1

Газопроницаемость (Р/І) и селективность (α) мембран до и после длительного контакта с загрязняющими агентами

Мембрана	Загрязняющий агент	Р/І до, м ³ /(м ² ·ч·бар)		α до, (CO ₂ /N ₂)	Р/І после, м ³ /(м ² ·ч·бар)		α после, (CO ₂ /N ₂)	Относительное снижение Р/І CO ₂ после загрязнения, %
		CO ₂	N ₂		CO ₂	N ₂		
M1	АБЭ	0,22	0,02	10,0	0,13	0,02	6,5	40±3
	Белок	0,29	0,03	9,7	0,05	0,01	5,0	85±5
	Лецитин	0,28	0,03	9,3	0,03	0,01	3,0	85±2
M2	АБЭ	0,22	0,02	11,2	0,22	0,02	11,0	1±1
	Белок	0,18	0,02	9,0	0,11	0,01	11,0	40±3
	Лецитин	0,10	0,02	5,0	0,08	0,01	8,0	20±2

ИК-спектры поверхности селективного слоя мембран после засорения показали, что полосы загрязняющих агентов имеют наибольшую интенсивность в спектре 0F/МФФК. В случае мембраны 50F5/МФФК интенсивность данных полос в 3.5 раза ниже (рис. 1). Следует также отметить, что для

мембраны 50F5/МФФК характерно меньшее общее снижение интенсивности силоксановых полос. Таким образом, применение мембран 50F5/МФФК для выделения биобутанола из ферментационной АБЭ-смеси позволяет поддерживать эффективное разделение в течение длительного времени, что хорошо сочетается с непрерывным ведением процесса ферментации.

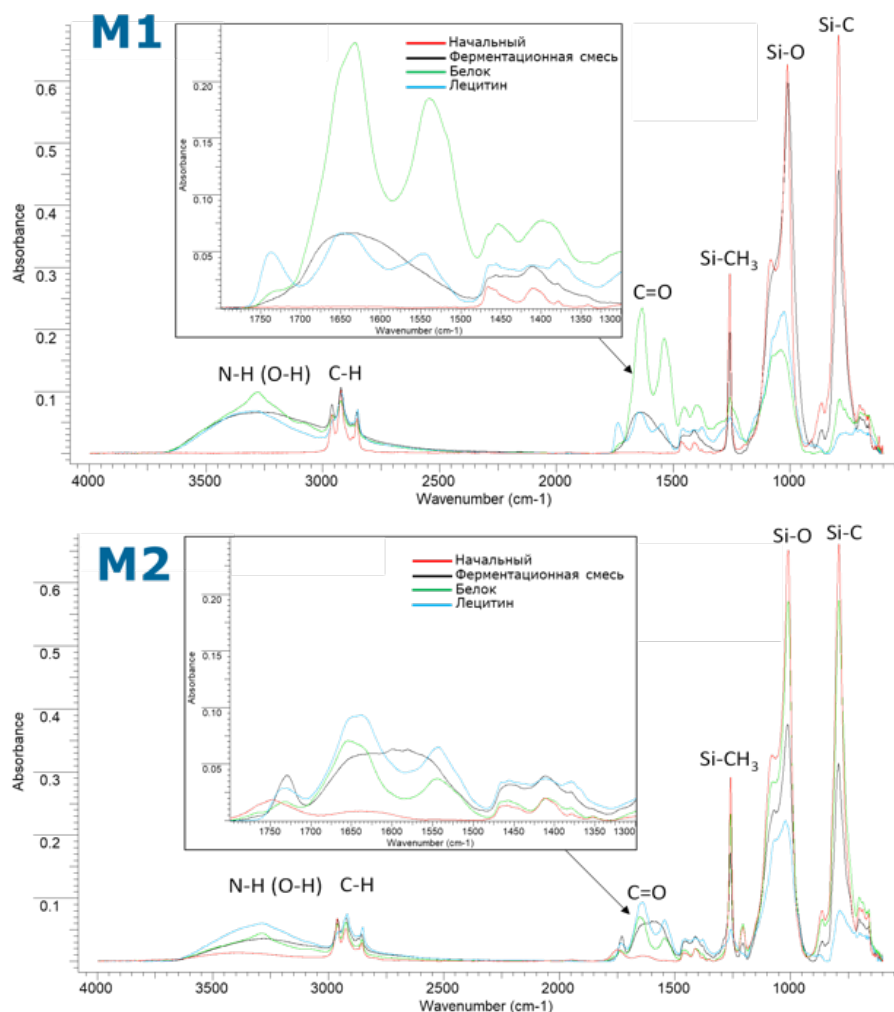


Рисунок 1 - ИК-спектры мембран до и после контакта с загрязняющими агентами

Закключение

Впервые синтезирован ряд сополимеров полиметилпентафторпропилакрилат и полидецилметилсилоксан. Методом ^1H ЯМР спектроскопии подтверждено близкое к количественному присоединение 2,2,3,3,3-пентафторпропил акрилата и 1-децена к полиметилгидросилоксану. Рассмотрено влияние состава сополимеров на газотранспортные свойства пленок по CO_2 , CH_4 и N_2 . Введение 2,2,3,3,3-пентафторпропилакрилата в полидецилметилсилоксан приводит к росту коэффициентов растворимости и проницаемости по CO_2 во всем исследованном диапазоне концентраций. Для зависимости коэффициентов диффузии от состава сополимеров был обнаружен экстремальный характер. Максимальное значение коэффициентов диффузии CO_2 , CH_4 и N_2 наблюдали для образца 50F5. На основе сополимера 50F5, характеризующегося минимальной поверхностной энергией и максимальным значением газопроницаемости и сорбции н-бутанола, были получены композиционные мембраны на микрофильтрационной подложке МФФК-1. Сравнительное исследование стабильности транспортных свойств мембран 50F5/MFFK и 0F/MFFK после 2х месячного контакта с растворами загрязняющих агентов (брага-АБЭ, лецитин, протеин) продемонстрировало наличие фторакрилатных групп в полимере селективного слоя позволяет минимум вдвое снизить, а случае АБЭ-браги практически полностью предотвратить относительное снижение проницаемости композиционной мембраны.

Выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках проекта 22-79-10332.

Список литературы

1. Kujawski W. Application of pervaporation and vapor permeation in environmental protection //Polish Journal of Environmental Studies. – 2000. – Т. 9. – №. 1. – С. 13-26.
2. Si Z. et al. Carbonized ZIF-8 incorporated mixed matrix membrane for stable ABE recovery from fermentation broth //Journal of membrane science. – 2019. – Т. 579. – С. 309-317.
3. Jiménez-Bonilla P., Wang Y. In situ biobutanol recovery from clostridial fermentations: a critical review //Critical reviews in biotechnology. – 2018. – Т. 38. – №. 3. – С. 469-482.
4. Zhang G. et al. Inorganic perovskite photocatalysts for solar energy utilization //Chemical Society Reviews. – 2016. – Т. 45. – №. 21. – С. 5951-5984.
5. Andruzzi L. et al. Synthesis and structure characterization of liquid crystalline polyacrylates with unconventional fluoroalkylphenyl mesogens //Macromolecules. – 2001. – Т. 34. – №. 22. – С. 7707-7714.
6. Rokhmanka T. N. et al. Fouling of polyalkylmethylsiloxane composite membranes during pervaporation separation of ABE-fermentation mixtures //Applied Sciences. – 2023. – Т. 13. – №. 6. – С. 3827.
7. Sharma P. K., Rao K. H. Analysis of different approaches for evaluation of surface energy of microbial cells by contact angle goniometry //Advances in colloid and interface science. – 2002. – Т. 98. – №. 3. – С. 341-463.

УДК 66.081.63

Назаров В.И., Макаренков Д.А., Попов А. П., Кузнецова Н.А., Бурковский С.С.

Особенности процесса переработки комплексных химических источников тока баромембранными методами для концентрирования литийсодержащих растворов

Назаров Вячеслав Иванович – к.т.н., доц., заместитель начальника отдела;

Макаренков Дмитрий Анатольевич – д.т.н., доц., первый заместитель руководителя ККХИ (ИРЕА) по научной работе;

Попов Александр Павлович – научный сотрудник, schrei6@yandex.ru;

НИЦ «Курчатовский институт»

Россия, Москва, 123182, Площадь Академика Курчатова, д.1.

Кузнецова Наталья Анатольевна – к.т.н., доц., доцент кафедры Процессы и аппараты химических технологий им. Н.И. Гельперина

МИРЭА – Российский технологический университет

Россия, Москва, 119571, Проспект Вернадского, д.86

Бурковский Сергей Степанович – менеджер проекта

АО «БВТ Барьер Рус»

Россия, Москва, 115432, Проектируемый проезд № 4062, д.6, стр. 16

В тезисах рассмотрен вопрос применения мембранных методов для концентрирования литиевых растворов, образующихся при рециклинге литиевых химических источников тока. Представлена установка по получению концентрированных растворов, включающая в себя модули ультрафильтрации и обратного осмоса. Выявлены зависимости процесса концентрирования модельных литийсодержащих растворов с применением обратноосмотических мембран. Приведены графические зависимости, отражающие процесс концентрирования растворов от рабочего давления в системе. Предложено решение для концентрирования реальных литийсодержащих растворов с использованием селективных экстрагентов.

Ключевые слова: литийсодержащие растворы, концентрирование, обратный осмос, селективность, литиевые аккумуляторы.

Features of the process of processing complex chemical current sources by baromembrane methods for concentrating lithium-containing solutions

Nazarov V.I.¹, Makarenkov D.A.¹, Popov A. P.¹, Kuznetsova N.A.², Burkovsky S.S.³

¹ NRC Kurchatov Institute, Moscow, Russian Federation

² MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russian Federation

³ BWT Barrier Rus, Moscow, Russian Federation

The abstract considers the issue of using membrane methods for concentrating lithium solutions formed during the recycling of lithium chemical power sources. A plant for obtaining concentrated solutions is presented, including ultrafiltration and reverse osmosis modules. Dependencies of the process of concentrating model lithium-containing solutions using reverse osmosis membranes are revealed. Graphic dependencies are given that reflect the process of concentrating solutions from the operating pressure in the system. A solution is proposed for concentrating real lithium-containing solutions using selective extractants.

Keywords: lithium-containing solutions, concentration, reverse osmosis, selectivity, lithium batteries.

Введение

В России ежегодно растёт использование электронных устройств связи и электромобилей, в которых применяются различные аккумуляторы с использованием литий-кобальтовых соединений. Производство комплексных химических источников тока (КХИТ) сдерживается отсутствием литиевого сырья, что приводит к импортозависимости. В то же время практически не решены проблемы экологически безопасной утилизации отработанных источников тока. Разработкой технологий их утилизации в России занимаются ГК «Мегаполисресурс» (Челябинск), НИТУ «МИСИС» (Москва), Национальная Экологическая Компания (НЭК)» (Москва) и НИЦ «Курчатовский институт» [1-3].

В этих технологиях используются следующие стадии: 1) разрядка КХИТ в растворах солей NaCl или Na₂CO₃; 2) вскрытие аккумуляторов в шредере в инертной среде или без неё; 3) измельчение с последующей классификацией в ножевом измельчителе; 4) помол с механоактивацией в шаровой мельнице или дезинтеграторе; 5) выщелачивание в системе «жидкость-твёрдое» в растворах неорганических кислот (HCl, H₂SO₄ или HNO₃); 6) химическое осаждение в системе «жидкость-

жидкость» с применением раствора NaOH. На этой стадии образуется осадок с соединениями Co, а литий остаётся в растворе в виде ионов с концентрацией от 0,01 до 0,017 % масс. В процессе утилизации отделяют металлические включения и полимеры.

Перспективным является направление получения целевых компонентов Co, Li, Mn, Ni, Cu, Al при переработке КХИТ. Такая технология разработана в НИЦ «Курчатовский институт» и представлена в виде блок-схемы на рис. 1.

Отработанные КХИТ подвергаются разрядке, а после достижения безопасного напряжения (менее 2,0 В) подаются на вскрытие в шредер. Вскрытие может осуществляться с подачей инертного газа или без него. После шредера отбираются металлические включения. Оставшаяся масса подвергается измельчению в ножевой мельнице и классификации с отделением полимеров. Далее чёрная масса с частицами Cu и Al подвергается помолу с механоактивацией в шаровой мельнице или дезинтеграторе с получением механоактивированных порошков. На виброкласификаторе на верхних ситах отделяются частицы Cu и Al, а мелкодисперсный порошок, содержащий целевые компоненты (Co, Li, Mn, Ni, графит) поступает на выщелачивание с применением неорганических кислот. Затем после фильтрования образуется раствор, который подвергается процессу химического осаждения с выделением осадка, содержащего Co Mn, Ni. Оставшийся после второй стадии фильтрования раствор, содержащий Li, можно концентрировать различными методами (выпаривание и обратный осмос).

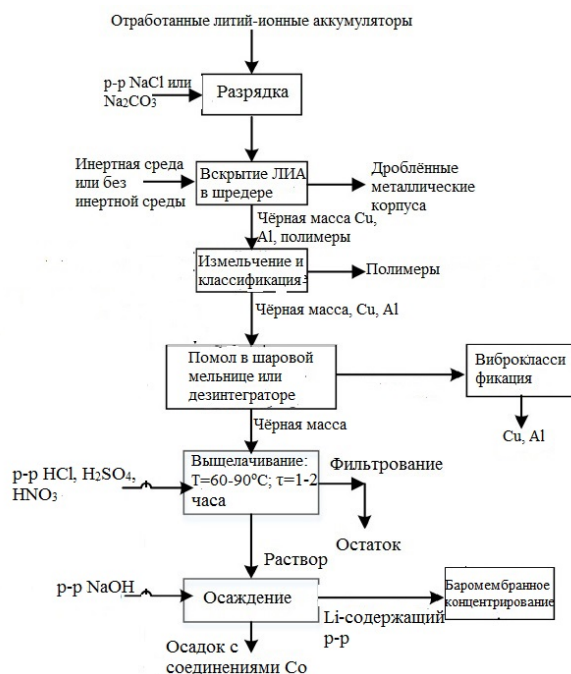


Рисунок 1 - Блок-схема утилизации литий-ионных аккумуляторов, разработанная в НИЦ «Курчатовский институт»

Экспериментальная часть

Для повышения концентрации Li в образующемся растворе после стадии осаждения нами предложено использовать баромембранную технологию. Данная технология используется для опреснения морской воды, селективного выделения тяжёлых металлов и др. Однако, с точки зрения концентрирования литийсодержащих растворов при переработке ЛИА этот процесс не изучен.

В НИЦ «Курчатовский институт» разработана баромембранная установка для очистки и концентрирования различных жидкостей. Установка размещена на раме и включает в себя узел с ультрафильтрационной мембраной, узел с мембраной обратного осмоса, капсульные фильтры, два центробежных насоса низкого давления (3-4 атм.) и один насос высокого давления мембранного типа (6-8 атм.). Установка также снабжена манометрами и отборниками проб. Обратноосмотический узел размещён на верхней раме, а ультрафильтрационный – на нижней раме. (рис. 2).



Рисунок 2 - Установка по получению концентрированных растворов

Установка может работать в двух независимых режимах: ультрафильтрации и обратного осмоса. При работе в режиме ультрафильтрации концентрируемый раствор проходит контур при давлении 2-3 атм, а при работе в режиме обратного осмоса – 6-8 атм. В модуле обратного осмоса используется полиамидная мембрана Filmtec TW30-1812-100. Она может работать в кислых и щелочных средах в диапазоне pH (2-11) при максимальном рабочем давлении до 21 атм.

Для проведения исследований был подготовлен модельный раствор сульфата лития (Li_2SO_4) в количестве 20 литров с концентрацией лития 0,02 % масс. Концентрация модельного раствора соответствовала концентрации раствора, который был получен в результате рециклинга КХИТ. Были проведены два эксперимента.

В эксперименте №1 процесс концентрирования 10 литров модельного раствора Li_2SO_4 осуществлялся следующим образом. Центробежным насосом раствор подавался в верхний обратноосмотический контур. Давление жидкости контролировалось манометром, расположенном на трубопроводе после центробежного насоса и на трубопроводе исходного раствора перед модулем обратного осмоса. Рабочее давление составило 3 атм. Исходный раствор в модуле делился на концентрат (ретентат), проходящий над мембраной, и на фильтрат (пермеат), проходящий через мембрану и собираемый в специальную ёмкость. Концентрат возвращался в исходную ёмкость, из которой затем подавался на обратноосмотический модуль повторно. Во время технологического цикла концентрация в исходной ёмкости увеличивалась в зависимости от времени работы установки. Общее время процесса концентрирования десяти литров раствора Li_2SO_4 с применением центробежного насоса составило 120 минут. Это связано с тем, что во время процесса раствор при движении по циклу достаточно быстро нагревался до температур 39-40 °С, которые являются граничными для работы полиамидных мембран. После охлаждения насоса цикл продолжался.

В эксперименте №2 при концентрировании 10 литров раствора Li_2SO_4 была проведена модернизация установки, представленной на рис. 2. Для этого вместо центробежного насоса использовался бустерный насос. ($P = 6-8$ атм), устанавливаемый в нижней части установки. Давление в системе обратного осмоса контролировалось перед входом в модуль и на выходе из него, и составило 7,5 атм. Повышенное рабочее давление в системе позволило сократить время процесса концентрирования раствора Li_2SO_4 со 120 до 25 минут. Необходимо заметить, что повышенное рабочее давление превышает осмотическое давление данного раствора и приводит к повышению эффективности концентрирования.

Результаты процесса концентрирования модельного раствора Li_2SO_4 на обратноосмотическом модуле представлены на рис. 3.

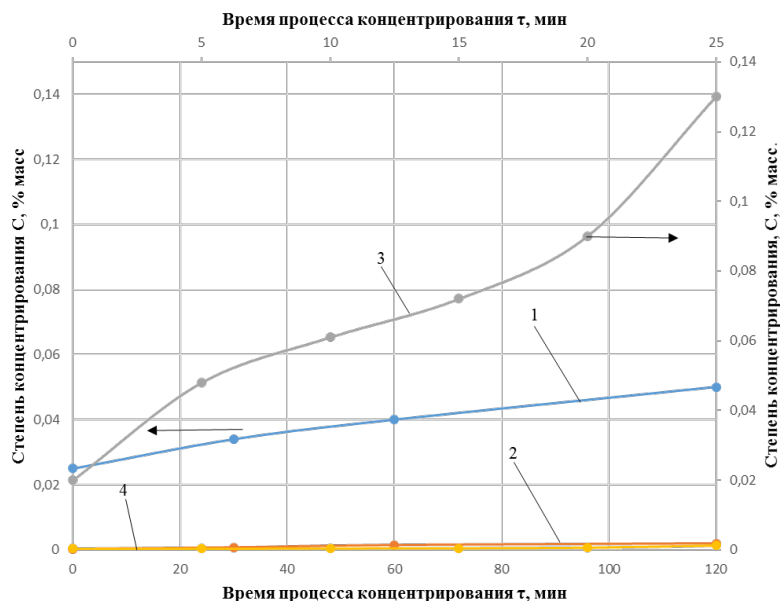


Рисунок 3 - Зависимость степени концентрирования модельного раствора Li_2SO_4 от времени процесса: 1 – кривая изменения концентрации в ретентате (эксперимент №1); 2 – кривая изменения концентрации в пермеате (эксперимент №1); 3 – кривая изменения концентрации в ретентате (эксперимент №2); 4 – кривая изменения концентрации в пермеате (эксперимент №2)

Из графических зависимостей (рис. 3) видно, что применение центробежных насосов с рабочим давлением $P = 3$ атм. позволило увеличить концентрацию лития в растворе Li_2SO_4 в 2 раза (с 0,025 до 0,05) % масс. При этом применение бустерного насоса с рабочим давлением $P = 7,5$ атм. позволило увеличить движущую силу процесса и обеспечить увеличение содержания лития в концентрате с 0,02 до 0,13 % масс, то есть в 6,5 раз.

Кроме того, по полученным результатам экспериментальных данных была рассчитана селективность мембраны обратного осмоса ϕ по фильтрату [4]:

$$\phi = \frac{C_0 - C_{\phi}}{C_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где: C_0 – концентрация вещества в исходной смеси (% масс.); C_{ϕ} – концентрация вещества в фильтрате (% масс.).

Результаты экспериментальных исследований по селективности мембраны обратного осмоса приведены на рис. 4.

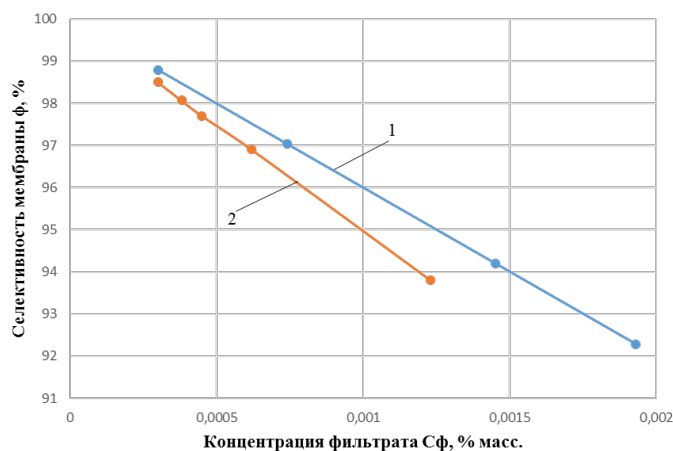


Рисунок 4 - Зависимость селективности мембраны обратного осмоса от роста концентрации фильтрата: 1 – эксперимент №1; 2 – эксперимент №2

Результаты исследований процесса селективности от концентрации фильтрата показывают, что повышение рабочего давления в системе обратного осмоса способствует более медленному снижению селективности мембраны применительно к исследуемым литийсодержащим растворам.

При концентрировании реальных литийсодержащих растворов, образующихся при рециклинге КХИТ, необходимо учитывать, что в них будет содержаться избыток натрия за счёт осаждения тяжёлых металлов с применением реагента NaOH. Тогда перед проведением процесса обратного осмоса необходимо определить экспериментально или рассчитать осмотическое давление ($P_{\text{осм}}$) раствора по уравнению Вант-Гоффа [5]:

$$P_{\text{осм}} = C_M \cdot R \cdot T, \quad (2)$$

где: C_M – молярная концентрация растворённого вещества (моль/л); R – универсальная газовая постоянная; T – температура процесса концентрирования (К).

Необходимо заметить, что при расчёте осмотического давления реального литийсодержащего раствора нужно учитывать компоненты, входящие в исходный раствор. Ориентировочный расчёт показал, что его осмотическое давление составляет 47,5 атм. Это свидетельствует о том, что перед началом процесса концентрирования реальных литийсодержащих растворов, из них необходимо предварительно удалять избыток натрия и другие примеси, например, методом селективной экстракции лития. Это позволит снизить осмотическое давление раствора для его дальнейшего концентрирования.

Заключение

Проведённые исследования процесса концентрирования модельного литийсодержащего раствора Li_2SO_4 показали, что основными характеристиками, влияющими на качество концентрирования лития, являются рабочее давление и температура процесса. Так, повышенное рабочее давление позволяет увеличить концентрацию раствора Li_2SO_4 от 2 до 6,5 раз. Кроме того, установлено, что концентрирование реальных литийсодержащих растворов в их исходном состоянии с применением стандартных обратноосмотических мембран затруднено. Это объясняется высоким осмотическим давлением реальных литийсодержащих растворов ($P_{\text{осм}} = 47,5$ атм.) вследствие переизбытка натрия. Для концентрирования таких растворов необходимо предварительно проводить процесс селективной экстракции лития по отношению к натрию. Применение предварительной селективной экстракции позволит снизить рабочее давление в системе и повысить эффективность баромембранного концентрирования литийсодержащих растворов.

Список литературы

1. Утилизация батареек и аккумуляторов [Электронный ресурс]: URL: <https://eco2eco.ru/utilizaciya/batareyki-i-akkumulyatory/> (дата обращения: 18.02.2025 г).
2. Кулифеев В.К. Утилизация литиевых химических источников тока: моногр./В.К. Кулифеев, В.П. Тарасов, О.Н. Криволапова. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2010. – 262 с.
3. Назаров В.И., Ретивов В.М., Макаренков Д.А. и др. Исследование многостадийной комплексной технологии переработки литий-кобальтовых источников тока с получением импортозамещающих соединений кобальта и лития//Металлург. 2023. №8. С. 108-118.
4. Назаров В.И. Исследование процесса очистки сточных вод и разделения жидких сред методами мембранной технологии. – М.: МГАХМ, 1997, - 28 с.
5. Дытнерский Ю.И. Баромембранные процессы. Теория и расчёт – М.: Альянс, 2019. – 272 с.

УДК 66.081.6

Рассохина А.В., Раева А.Ю., Анохина Т.С., Хаширова С.Ю., Борисов И.Л.

Высокопроницаемые полуволоконные мембраны из полифениленсульфона для ультрафильтрации водных сред

Рассохина Арина Витальевна – ст. лаборант; rassokhinaarinaa@gmail.com.

¹ ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени «Институт нефтехимического синтеза имени А. В. Топчиева» Российской академии наук, Россия, Москва, 119991, Ленинский проспект, 29.

Раева Алиса Юрьевна – м.н.с;

Борисов Илья Леонидович – в.н.с.

Хаширова Светлана Юрьевна - Проректор по НИР, профессор, директор Центра прогрессивных материалов и аддитивных технологий КБГУ, председатель НТС, в.н.с.

¹ ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени «Институт нефтехимического синтеза имени А. В. Топчиева» Российской академии наук, Россия, Москва, 119991, Ленинский проспект, 29.

² Центр прогрессивных материалов и аддитивных технологий, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, 360004 Нальчик, Россия

Анохина Татьяна Сергеевна – и.о. зав. лабораторией, с.н.с.

ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени «Институт нефтехимического синтеза имени А. В. Топчиева» Российской академии наук, Россия, Москва, 119991, Ленинский проспект, 29.

В тезисах рассмотрено влияние молекулярной массы и химической структуры концевых групп полифениленсульфона (ПФСФ) на характеристики ультрафильтрационных (УФ) полуволоконных мембран. Были синтезированы полимеры ПФСФ (67-81 кг/моль) с соотношением гидроксильных и хлорных концевых групп 0,43-17,0. СЭМ показала, что увеличение количества хлорных концевых групп создает более открытую пористую структуру. Проницаемость мембран по воде составила 79-136 л/(м²×ч×атм) при коэффициенте задерживания модельного красителя Blue Dextran с молекулярной массой 70 кг/моль не менее 94,7 %.

Ключевые слова: полифениленсульфон, концевые группы, полуволоконная мембрана, ультрафильтрация, проницаемость

Highly permeable polyphenylene sulfone hollow fiber membranes for ultrafiltration of aqueous media

Rassokhina A.V.¹, Raeva A.Yu.^{1,2}, Anokhina T.S.¹, Khashirova S.Yu.^{1,2}, Borisov I.L.^{1,2}

¹ Federal State Budgetary Institution of Science "A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis" of the Russian Academy of Sciences, 29 Leninsky Prospect, Moscow, 119991, Russia.

² Center for Progressive Materials and Additive Technologies, Kabardino-Balkarian State University Named After H.M. Berbekov, 360004 Nalchik, Russia

This thesis discusses the effect of polyphenylene sulfone (PPSU) molecular weight and end-group chemical structure on characteristics of ultrafiltration (UF) hollow fiber membranes. PPSU polymers (67–81 kg/mol) with hydroxyl-to-chlorine end group ratios of 0.43–17.0 were synthesized. SEM revealed that increasing chlorine end groups creates a more open porous structure. The highest UF permeance (136 L/(m²·h·bar)) and 94.7% rejection of Blue Dextran were achieved with the PPSU sample containing the most chlorine end groups.

Key words: polyphenylene sulfone; end groups; hollow fiber membrane; ultrafiltration; permeance

Введение

В условиях увеличения количества случаев загрязнения воды и заболеваний, передающихся через воду, проблема эффективной водоочистки приобретает особую актуальность. Мембранные технологии, в частности ультрафильтрация и микрофильтрация, представляют собой перспективный метод удаления микроорганизмов и загрязняющих веществ благодаря своей энергоэффективности, экологичности и возможности многократного использования. Среди различных типов мембран наибольшее внимание уделяется ассиметричным полуволоконным мембранам, обладающим высокой площадью поверхности контакта с разделяемой смесью и компактностью конструкции. Одним из перспективных материалов для получения таких мембран является полифениленсульфон (ПФСФ), который отличается высокой термической стабильностью, химической стойкостью и способностью сохранять механические свойства при обработке перегретым паром [1]. Однако коммерческие марки ПФСФ зачастую обладают недостаточной молекулярной массой и низкой растворимостью, что ограничивает их применение в ходе получения мембран растворным методом. В этой связи синтез

ПФСФ с оптимизированными характеристиками становится ключевым этапом в разработке новых высокопроницаемых ультрафильтрационных мембран. Поэтому в рамках этой работы были поставлены следующие задачи: синтез ПФСФ, исследование характеристик синтезированных полимеров, получение и исследование свойств формовочных растворов, а также получение ультрафильтрационных полволоконных мембран и исследование их морфологии, транспортных и разделительных свойств.

Экспериментальная часть

В этом исследовании была синтезирована серия полифениленсульфонов с молекулярными массами в диапазоне от 67 до 81 кг/моль с различной химической структурой концевых групп – гидроксильных и хлорных. Для синтеза ПФСФ в качестве мономеров использовали 4,4'-дигидроксифенил (ДГБФ) и 4,4'-дихлордифенилсульфон (ДГДФС), в качестве растворителя – N,N-диметилацетамид (ДМАА), в качестве щелочного агента – карбонат калия. Для проведения реакции неравновесной поликонденсации ДГБФ и ДГДФС были взяты в соотношении, указанном в таблице 1.

Таблица 1

Соотношение мономеров в ходе синтеза ПФСФ

Образец	ДГБФ:ДГДФС
ПФСФ-1	1:1,02
ПФСФ-2	1:1
ПФСФ-3	1,005:1
ПФСФ-4	1,008:1

Для детальной характеристики синтезированных ПФСФ использовали гель-проникающую хроматографию (ГПХ), спектроскопию ядерного магнитного резонанса (ЯМР), дифференциальную сканирующую калориметрию (ДСК), а также определяли числа осаждения. Полученные данные позволили оценить молекулярно-массовые характеристики, химическую структуру и термическую стабильность полимеров.

Далее формовочные растворы для получения мембран готовили из полимера, растворителя N-метил-2-пирролидона (НМП) и порообразующего агента полиэтиленгликоля (ПЭГ) в соотношении 20/50/30 масс. %. Динамическую вязкость этих растворов измеряли с использованием ротационного реометра Anton Paar MCR 72, что позволило оптимизировать условия для получения полволоконных мембран методом сухо-мокрого формования в варианте «свободного прядения». Морфологию полученных мембран исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Измерение транспортных и разделительных свойств полволоконных ПФСФ мембран проводили в проточном режиме при значении трансмембранного давления 1 атм, что позволило определить водопроницаемость мембран и коэффициент задерживания модельного красителя Blue Dextran ($M_w = 70$ кг/моль). Проницаемость определяли по формуле (1):

$$P = \frac{V}{S \cdot t \cdot \Delta p}, \quad (1)$$

где, P – проницаемость, л/(м²·ч·атм);

S – площадь поверхности селективного слоя полволоконной мембраны, м²;

V – объем отобранной пробы, л;

t – время отбора пробы, ч;

Δp – избыточное давление, атм.

Коэффициент задерживания рассчитывался согласно формуле (2):

$$R = \frac{1 - C_p}{C_{исх}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где, R – коэффициент задерживания, %;

C_p – концентрация растворенного вещества в пермеате, (мг/л);

$C_{исх}$ – концентрация растворенного вещества в исходном потоке, мг/л.

P – проницаемость, л/(м²·ч·атм);

S – площадь поверхности селективного слоя полволоконной мембраны, м²;

V – объем отобранной пробы, л;

t – время отбора пробы, ч;

Δp – избыточное давление, атм.

В ходе анализа ЯМР-спектров синтезированных ПФСФ были обнаружены сигналы, соответствующие протонам ароматических колец основной цепи, а также протонам концевых групп, связанных с ОН- и Cl- группами. Изменение соотношения мономеров привело к варьированию содержания концевых групп, что повлияло на растворимость полимера в НМП и, как следствие, на характеристики формовочных растворов (Таблица 2).

Таблица 2

Результаты исследования синтезированных ПФСФ методами ГПХ и ЯМР

Образец	M_p , кг/моль	M_w , кг/моль	M_n , кг/моль	M_w/M_n	$M_{ЯМР}$	ДГБФ:ДХДФ С в синтезе	ОН:Cl в полимере	η_{OH}	η_{CL}
ПФСФ-1	75	81	24	3,4	12,7	1:1,02	0,43	0,010	0,023
ПФСФ-2	56	67	25	2,6	10,5	1:1	1,7	0,020	0,012
ПФСФ-3	76	78	33	2,4	15,3	1,005:1	11	0,022	0,002
ПФСФ-4	64	72	44	1,6	15,7	1,008:1	17	0,017	0,001

Данные ГПХ подтвердили, что молекулярная масса синтезированных образцов находится в диапазоне 67–81 кг/моль, а также была выявлена прямая зависимость динамической вязкости от молекулярной массы полимера: с увеличением молекулярной массы вязкость растворов системы ПФСФ/НМП возрастала с 4250 до 9150 мПа·с (рис.1).

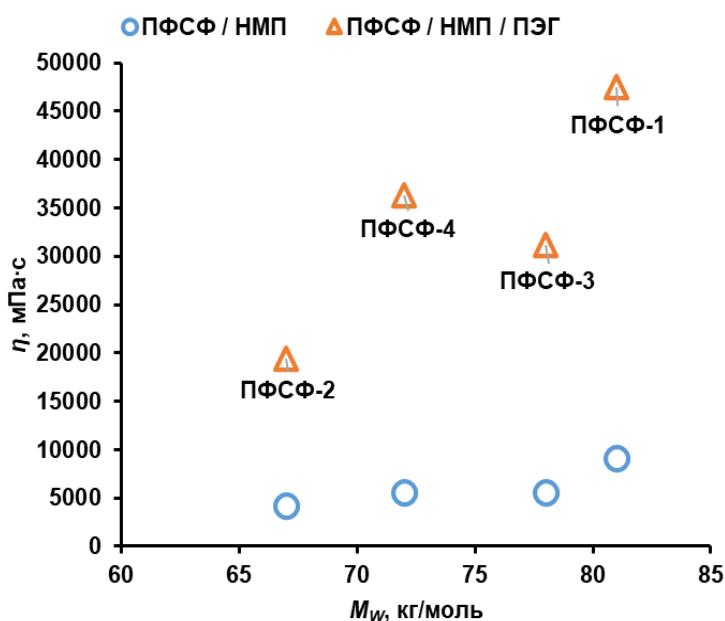


Рисунок 1 - Зависимость динамической вязкости двух- и трехкомпонентных растворов ПФСФ от молекулярной массы.

Добавление ПЭГ в состав раствора приводило к значительному увеличению вязкости в 4,5–6,5 раз. Кроме того, наблюдалась зависимость динамической вязкости от полидисперсности: чем выше коэффициент полидисперсности, тем больший вклад в динамическую вязкость вносит низкомолекулярная фракция, занижая данное значение.

Результаты исследования полимеров методом ДСК показали, что синтезированные ПФСФ обладают близкими значениями температуры стеклования (225–228 °С). Такая высокая термическая стабильность является важным условием для применения мембран в условиях стерилизации

перегретым паром, поскольку она обеспечивает сохранение структуры и эксплуатационных характеристики при стерилизации.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) полученных в рамках работы полволоконных мембран из трехкомпонентных растворов выявила наличие развитой пальцеобразной пористой структуры в подложечном слое мембран (рис.2). При этом внутренний селективный слой оказался достаточно плотным, что подтверждает высокую задерживающую способность мембран.

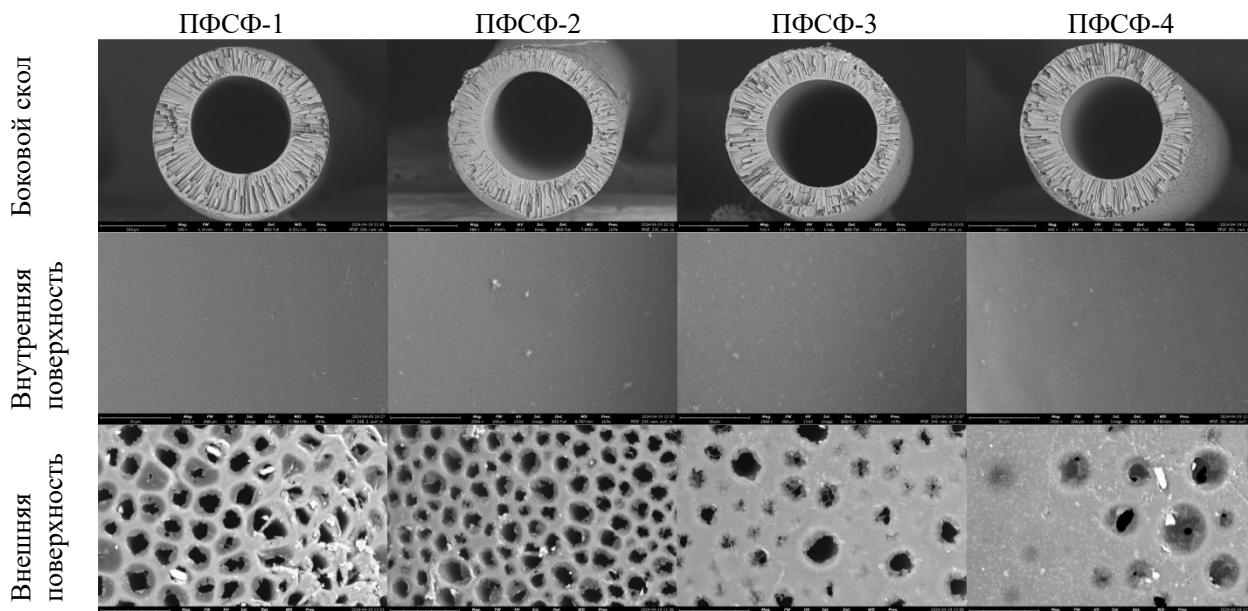


Рисунок 2 - СЭМ-фотографии полволоконных мембран из синтезированных ПФСФ.

Дополнительно анализ показал, что на морфологию полволоконных мембран в большей степени влияла химическая структура полимера, в частности, содержание хлорных концевых групп. С увеличением мольной доли последних наблюдали образование более открытой пористой структуры внешней поверхности полволоконных мембран, что положительно влияло на фильтрационные характеристики образцов.

Результаты исследования транспортных и разделительных свойств продемонстрировали, что полученные мембраны обладают водопроницаемостью 79-136 л/(м²×ч×атм) при коэффициенте задерживания модельного красителя Blue Dextran с молекулярной массой 70 кг/моль не менее 94,7 % (рис.3).

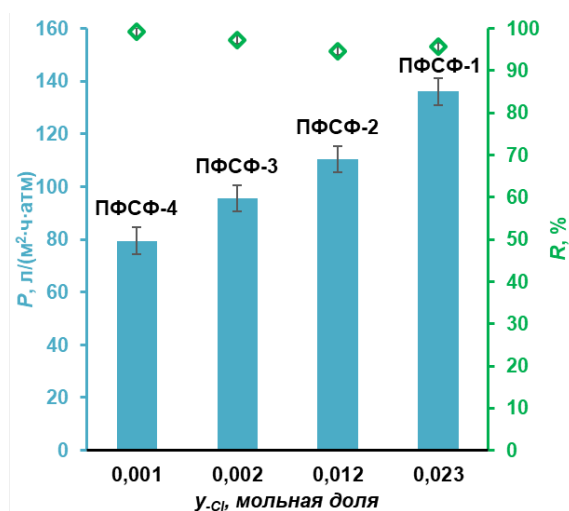


Рисунок 3 - Зависимость транспортных и разделительных свойств полволоконных мембран от мольной доли концевых хлорных групп.

На текущий момент, это наилучший результат среди полуволоконных мембран из немодифицированного ПФСФ (Таблица 3), что обусловлено снижением молекулярной массы полимера со 102 до 81 кг/моль и, как следствие, формированием менее плотной пористой структуры, создающей гидравлическое сопротивление потоку воды.

Таблица 3

Фильтрационные характеристики полуволоконных ПФСФ мембран

М _w , кг/моль	Р, л/(м ² ·ч·атм)	Калибрانت	Р, %	Источники
50	65	БСА*	95,2	[2]
102	95,7	Blue Dextran	99,9	[3]
81	136		96	Эта работа

*Бычий сывороточный альбумин, М_w = 69 кг/моль.

Заключение

В рамках работы было показано, что ключевым фактором, влияющим на фильтрационные характеристики, является химическая природа концевых групп ПФСФ. Преобладание хлорных групп способствует улучшению растворимости полимера в НМП и формированию более рыхлой структуры мембраны, что приводит к увеличению водопроницаемости. Одновременно сохранение высокой селективности обеспечивает эффективное удаление загрязняющих веществ, что является критически важным для применения мембран в системах очистки воды.

Применение синтезированных полимеров позволило получить полуволоконные ультрафильтрационные мембраны с высокой водопроницаемостью (до 136 л/(м²·ч·атм)) и коэффициентом задерживания модельного красителя Blue Dextran не менее 94,7 %. Разработанные ультрафильтрационные полуволоконные мембраны представляют собой эффективное решение для современных задач водоочистки, сочетая высокую проницаемость и селективность.

*Выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-19-00711)
<https://rscf.ru/project/22-19-00711/>*

Список литературы

1. Ultrason® E, S, P Product Brochure—Plastics & Rubber. [Электронный ресурс] – URL: https://plastics-rubber.basf.com/southamerica/en/performance_polymers/products/ultrason (дата обращения 14.03.2025).
2. Praneeth, K.; James, T.; Sridhar, S. Design of novel ultrafiltration systems based on robust polyphenylsulfone hollow fiber membranes for treatment of contaminated surface water. Chem. Eng. J. 2014, 248, 297–306.
3. Anokhina, T.; Raeva, A.; Sokolov, S.; Storchun, A.; Filatova, M.; Zhansitov, A.; Kurdanova, Z.; Shakhmurzova, K.; Khashirova, S.; Borisov, I. Effect of Composition and Viscosity of Spinning Solution on Ultrafiltration Properties of Polyphenylene Sulfone Hollow-Fiber Membranes. Membranes 2022, 12, 1113.

УДК 628 С247

Русин А.И., Прохорова М.А., Захаров С.Л.

Конструирование аппарата с сальниковым уплотнением основных рабочих элементов в виде цилиндрических пористых трубок для очистки растворов

Русин Антон Иванович – студент; antonrusin2018@gmail.com

Прохорова Мария Александровна – студент; mariamansfeld23@gmail.com

Захаров Станислав Леонидович – д.т.н., доц., профессор кафедры Инженерного проектирования технологического оборудования;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

Представленная разработка аппарата с сальниковым уплотнением осуществлена в программе «Компас-3Д V-22 Учебная версия». В работе рассмотрен вариант возможного получения ассоциативного чертежа при проектировании в 3Д аппаратов очистки в программе «Компас-3Д V-22 Учебная версия»

Ключевые слова: сальниковое уплотнение, проектирование, цилиндрической формы трубки, ассоциативный чертеж, «Компас-3Д V-22 Учебная версия»

Design of a device with gland sealing of the main working elements in the form of cylindrical porous tubes for cleaning solutions

Rusin A.I. – student; antonrusin2018@gmail.com

Prokhorova M.A. – student; mariamansfeld23@gmail.com

Zakharov Stanislav Leonidovich - Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Engineering Design of Technological Equipment;

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “D.I. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia”

Russia, Moscow, 125047, Miusskaya square, house 9.

The presented development of the apparatus with a gland seal is implemented in the program «Kompas-3D V-22 Educational version». The work considers the option of possible obtaining of an associative drawing when designing in 3D cleaning devices in the program «Kompas-3D V-22 Educational version»

Keywords: gland seal, design, cylindrical tube, associative drawing, «Kompas-3D V-22 Educational version»

Введение

Актуальной проблемой процессов и аппаратов химических технологий в настоящее время остается разработка эффективных способов герметизации рабочих элементов в аппарате. Исходя из этого главной задачей нашего исследования является предотвращение утечек рабочей среды, что не только влияет на эффективность работы оборудования, но и обеспечивает безопасность всего технологического процесса. Разработанные ранее аппараты с разъемными соединениями типа плоскость-плоскость применимы для сравнительно небольших рабочих давлений и поэтому разработка аппарата с сальниковым уплотнением в настоящее время является актуальной. Это потребовало изменения конструкции аппарата в части герметизации основного рабочего элемента в виде пористой полупроницаемой трубки.

Экспериментальная часть

Проектирование аппарата начинаем с разработки задания в 3Д программы «Компас-3Д V-22 Учебная версия» для того, чтобы приступить к выполнению непосредственно чертежа в 2Д [1–4].

Схематично разрабатываемый аппарат представлен на рис. 1.

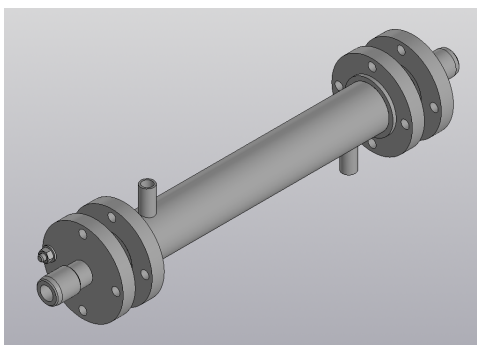


Рисунок 1 - Схема аппарата Ж-СКФ в 3Д.

В процессе проектирования высоконапорных аппаратов нам потребовалось выбрать специализированное программное обеспечение. Выбор инструментов проектирования имеет критическое значение для обеспечения точности расчетов, моделирования поведения аппарата под воздействием высоких давлений и, в конечном итоге, для гарантии безопасности и надежности конструкции. В рамках данного исследования мы выбрали систему автоматизированного проектирования «Компас-3Д V-22 Учебная версия» в качестве основной платформы. Этот выбор обусловлен рядом факторов, включая доступность учебной версии программы для студентов, интуитивно понятный интерфейс и широкий набор инструментов для создания трехмерных моделей и чертежей. «Компас-3Д V-22 Учебная версия» позволяет проводить параметрическое моделирование, что значительно облегчает внесение изменений в конструкцию и анализ результатов.

Подобно тому, как для инженера-технолога сборочные чертежи, которые разрабатывают не технологические службы менее предпочтительны по сравнению с чертежами общего вида, так и краны, вентили, заслонки, задвижки, а также болты, шпильки, шайбы, гайки и пр. запорно-регулирующая арматура, в технологических разработках не вычерчиваются по правилам сборочного чертежа, а выбираются из заранее разработанного специальными службами механической направленности библиотеки данных. Аналогичным образом разрабатываются отдельные элементы аппаратов и присовокупляются к основной корпусной детали. В данном случае это шайбы специальные, втулки сальника и т.д.

Для формирования параметрического изображения целесообразно применять библиотеки фрагментов. В таких библиотеках возможно систематическое хранение разнообразных типовых элементов с произвольными комментариями. Использование библиотек фрагментов значительно облегчает поиск и интеграцию готовых изображений в 3D-модель. В процессе разработки аппарата с сальниковым уплотнением, данная библиотека была использована для сохранения смоделированной втулки сальника и сальниковой коробки. В дальнейшем сохраненные детали были объединены в сборку.

Этапы построения включают моделирование деталей аппарата с помощью инструментов программы «Компас-3Д V-22 Учебная версия», используя инструменты твердотельного моделирования, такие как «Элемент выдавливания», «Вырезать выдавливанием», «Фаска».

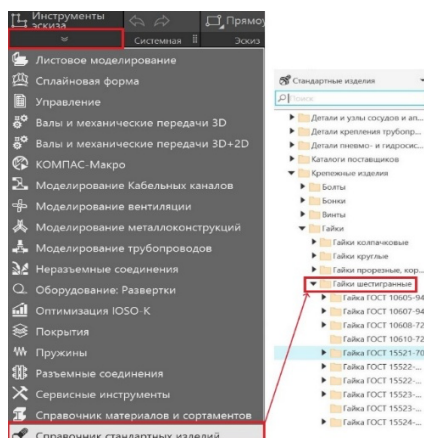


Рисунок 2 - Выбор стандартных изделий из библиотеки.

С помощью справочника стандартных изделий выбираются необходимые крепежные соединения (гайка, шпилька, шайба) (рис. 2). Для этого мы выбирали опцию «справочник стандартных изделий», находящуюся в конце списка инструментов для моделирования. После открытия поля библиотеки стандартных изделий нашли подходящее изделие, выбрали основные параметры и добавили деталь. Применение данного справочника для изготовления деталей аппарата обеспечивает соответствие необходимым нормам и стандартам, что, в свою очередь, гарантирует надежность и безопасность конструкции при высоком давлении. Стандартизация облегчает процессы сборки, обслуживания и расчета прочности, минимизируя риски, связанные с несовместимостью элементов. Это свидетельствует о долговечности и безопасности устройства в части герметизации процесса.

Модель аппарата, функционирующего при повышенных давлениях, представлена на рисунке 3 в системе компас 3D с вырезом 1/4 для изображения внутренних элементов детали. После тщательной проработки нескольких вариантов, мы пришли к выводу, что данная модель является наиболее приемлемой. Она отличается простотой в эксплуатации и надежностью конструкции.

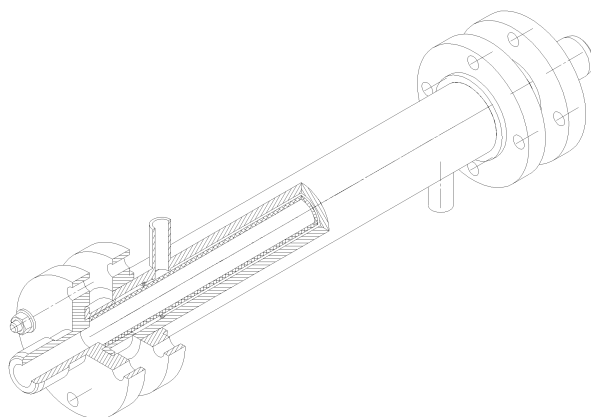


Рисунок 3 - Разработанный аппарат в системе Компас 3D с разрезом 1/4.

После завершения сборки мы приступили к созданию 2D-чертежа (рис. 4). Чертеж высоконапорного аппарата с сальниковым уплотнением был оформлен как ассоциативный чертеж, что означало, что любые изменения в 3D-модели автоматически обновляли соответствующие элементы на 2D-чертежах.

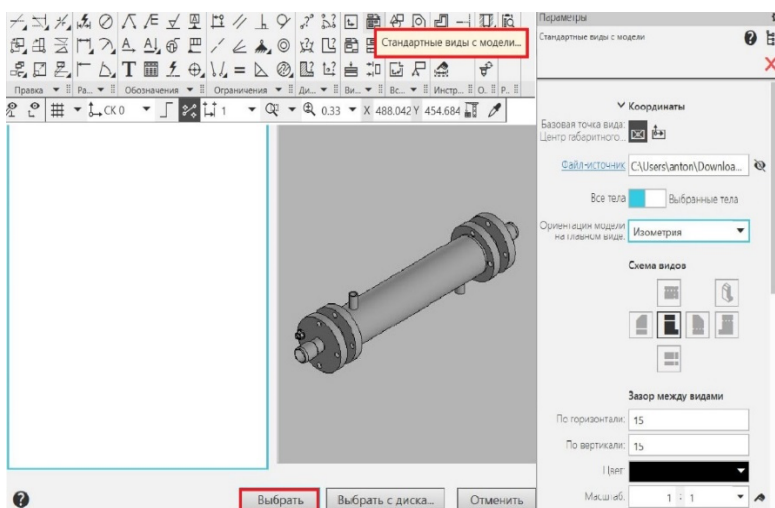


Рисунок 4 - Опция создания чертежа 2D из 3D.

На рис. 5 представлено детализированное изображение спроектированного аппарата, сконструированного в соответствии с разработанными чертежами и выполненного в двухмерной

сборке. Выбор сальникового уплотнительного материала способствовал снижению металлоемкости и компактности конструкции, что в свою очередь позволило сохранить герметичность в удовлетворительном состоянии. Предположительно, спроектированный, изготовленный и прошедший испытания аппарат показал отличные эксплуатационные характеристики при работе с органическими средами, демонстрируя надежность и стабильность функционирования в заданных условиях.

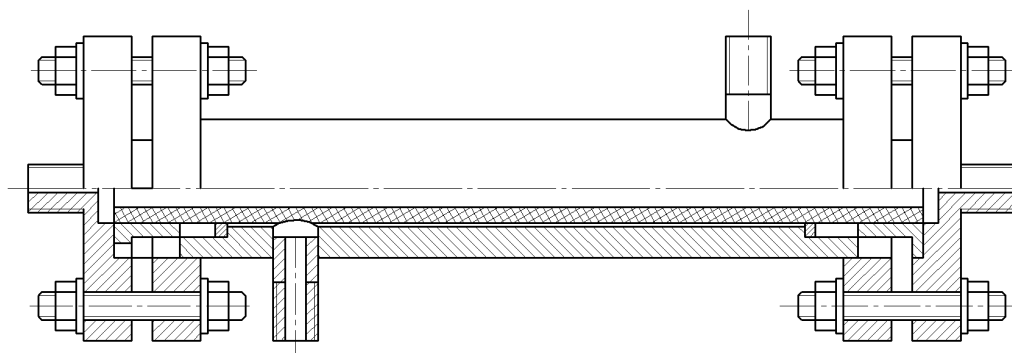


Рисунок 5 - Ассоциативный чертеж аппарата мембранного разделения с сальниковым уплотнением рабочего элемента в программе «Компас-3Д V-22 Учебная версия».

Представленный на рис. 5 аппарат имеет особенности, которые характеризуются мягким и в тоже время надежным обеспечением герметичности основных рабочих элементов в виде цилиндрических трубок. Сальниковая коробка набивается фторопластовой стружкой либо заранее выточенными кольцами в виде лепестков. В материал фторопласт-4 часто вводят графитовые добавки для устранения текучести фторопласта. Между резьбой и сальниковой набивкой спроектирована шайба специальная для устранения возможности попадания материала набивки в резьбу. Герметизация осуществляется плавным поджатием втулки сальниковой, конусная поверхность которой под углом 120° обеспечивает подачу материала сальниковой коробки от периферии к центру трубок, что обеспечивает надежную герметизацию в достаточно длительном периоде времени.

Заключение

Методика проектирования аппаратов мембранного разделения с сальниковым уплотнением рабочего элемента в программе «Компас-3Д V-22 Учебная версия» показало, что опытный образец аппарата с сальниковым уплотнением показал себя достаточно эффективным способом герметизации. Осуществленная нами работа подтвердила, что аппарат с сальниковым уплотнением гораздо более герметичен по сравнению с аппаратом, разработанным по типу соединения плоскость-плоскость.

Предложенный вид герметизации аппаратов может быть рекомендован при проектировании и изготовлении различного рода аппаратов.

Список литературы

1. Дытнерский Ю. И. Обратный осмос и ультрафильтрация. М.: Химия, 1978. 352 с, ил.
2. Каграманов, Г. Г. Диффузионные мембранные процессы. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2013. 112 с.
3. Свитцов А. А. Введение в мембранные технологии. М.: ДеЛи принт, 2007, 280 с.
4. В. М. Аристов. С. Л. Захаров, Ю. С. Лукина, А. Н. Клокова. Чертежи сборочных единиц. Методические указания к выполнению листа «Сборочный чертеж». М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2013.

УДК 66.081.6-278

Сморodin К.А., Крючков С.С., Атласкин А.А., Сысоев А.А., Атласкина М.Е.,
Воротынцев И.В.

Исследование режимов работы мембранного каскада «непрерывная мембранная колонна» для задачи разделения воздуха

Сморodin Кирилл Александрович – аспирант 3-го года обучения, младший научный сотрудник
smorodin.k.a@muctr.ru;

Крючков Сергей Сергеевич – аспирант 4-го года обучения, младший научный сотрудник;

Атласкин Артем Анатольевич – к.т.н., старший научный сотрудник;

Сысоев Александр Андреевич – аспирант 1-го года обучения, лаборант химического анализа;

Атласкина Мария Евгеньевна – к.т.н., старший научный сотрудник;

Воротынцев Илья Владимирович – д.т.н., профессор кафедры физической химии;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

Работа посвящена изучению режимов работы мембранного каскада типа «непрерывная мембранная колонна» для задач разделения воздуха и концентрирования кислорода при разделении бинарной газовой смеси ($O_2 / N_2 = 21 / 79$ об.%). Для разделения воздушной газовой смеси на компоненты был разработан мембранный каскад и рассмотрены различные режимы работы. Получены зависимости чистоты целевого продукта в зависимости от соотношения потоков. В ходе изучения работы режимов мембранного каскада удалось достигнуть концентрации кислорода 50 об.% в секции обогащения и сконцентрировать азот до 99.5 об.% в секции извлечения.

Ключевые слова: мембраны, газоразделение, мембранное газоразделение, мембранный каскад, полисульфон, stage-cut.

Investigation of operating modes in the membrane cascade "continuous membrane column" for air separation.

Smorodin K.A., Kryuchkov S.S., Atlaskin A.A., Sysoev A.A., Atlaskina M.E., Vorotyntsev I.V.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

This work is devoted to the study of the operating modes of a membrane cascade of the "continuous membrane column" type for the tasks of air separation and oxygen concentration during separation of a binary gas mixture ($O_2/N_2 = 21 / 79$ mol.%). To separate the air gas mixture into components, a membrane cascade was developed and various operating modes were considered. The dependences of the target product purity on the flow ratio were obtained. During the study of the membrane cascade operating modes, it was possible to achieve an oxygen concentration of 50 vol.% in the enrichment section and concentrate nitrogen to 99.5 vol.% in the enrichment section.

Key words: membranes, gas separation, membrane gas separation, membrane cascade, polysulfone, stage-cut

Введение

Разделение воздуха является одним из основных источников азота и кислорода для химической промышленности на сегодняшний день [1,2]. Чистый азот используют в качестве сырья для производства аммиака, азотных удобрений, в нефтехимии и для создания инертной среды в различных процессах химической промышленности. Кислород необходим для нефтехимических процессов, кислородной конверсии метана, металлургии, медицины и ракетного топлива. Стоимость чистых газов (с концентрацией >95об.%) обычно складывается из стоимости приобретения и очистки. Однако для кислорода и азота конечная стоимость определяется стоимостью разделения поскольку их можно получить из воздуха.

В промышленности для разделения воздуха на компоненты чаще всего применяются три основных метода: криогенная ректификация, короткоцикловая адсорбция и мембранное разделение газов. Криогенное разделение воздуха является наиболее развитым и распространенным методом, позволяющим разделять воздух по компонентам с получением продуктов высокой чистоты [3]. Однако этот метод имеет недостаток — высокую энергоёмкость, вызванную необходимостью поддержания низких температур (до -200 °C), что делает его экономически целесообразным преимущественно для крупнотоннажного производства.

Метод короткоцикловой адсорбции (КЦА) эффективен для среднетоннажных производств и процессов, но также не лишен недостатков: высокое энергопотребление и сложность технологического оформления [4].

Метод мембранного газоразделения в настоящее время является перспективным, особенно в контексте зеленой химии [5-7]. Так как многие производства ориентированы на снижение энергопотребления, метод мембранного газоразделения становится привлекательной альтернативой традиционным методам разделения воздуха. Мембранные установки могут разделять газовые смеси на компоненты при комнатной температуре без фазовых переходов, что устраняет необходимость в подаче или отведении тепла. В некоторых исследованиях подчеркивается, что мембранное газоразделение позволяет в одну стадию получить азот с чистотой более 99 об. % и кислород с чистотой 50 об.%. Более того, в то время как криогенные и адсорбционные методы разделения воздуха имеют ограничения с точки зрения экономической целесообразности по отношению к масштабу производства, мембранная технология может быть легко масштабирована и применена как на самых крупных, так и на самых маленьких производствах [8].

Цель работы – исследование режимов работы мембранного каскада типа «непрерывная мембранная колонна» для задачи разделения воздуха на целевые компоненты.

Экспериментальная часть

В рамках исследования был спроектирован мембранный каскад типа «непрерывная мембранная колонна» для задач разделения воздуха. Разработанный мембранный каскад включает в себя три основных элемента: первый мембранный модуль представляет из себя секцию извлечения (производит поток концентрат N_2), два других мембранных модуля находятся в секции обогащения (производит поток обогащенный O_2) (Рис.1). Система содержит в себе вакуум-компрессор, запорную арматуру, датчики давления и ротаметры. В качестве мембран были выбраны полуволоконные мембраны на основе полисульфона которые отличаются высокой производительностью и хорошей селективностью по паре газов O_2/N_2 . Корпуса мембранных модулей изготавливались из полипропиленовых труб, муфт и фитингов. Герметизация мембранных модулей осуществлялась с помощью полиуретанового герметика. Основные элементы мембранного каскада соединены запорной арматурой и стальной трубкой 6мм Ну-lok (Корея). Контроль значений давления осуществляется с помощью датчиков ОВЕН с ИТП-10. Контроль и регулировка потоков осуществляется с помощью ротаметров LZM-4Т (Китай). Давление подаваемой газовой смеси поддерживается с помощью редуктора Drastar (Корея).

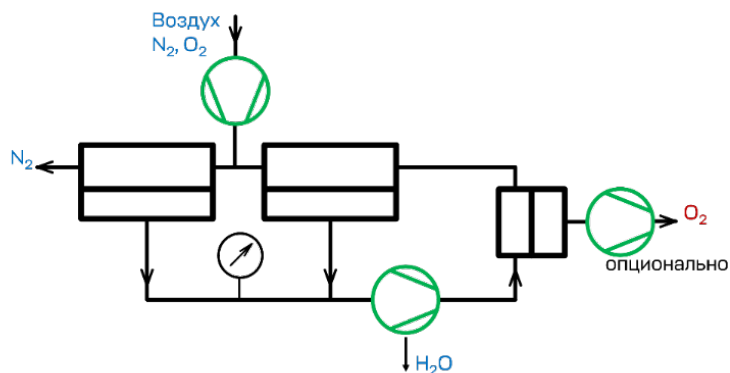


Рисунок 1 - Принципиальная схема мембранного каскада типа «непрерывная мембранная колонна»

Перед началом эксперимента система проверяется на герметичность. Предварительно мембранный каскад подвергается вакуумированию с помощью вакуум-компрессора Vacuubrand MD 4T (Германия). При достижении минимальных значений давления в системе (2 мбар) сброс перекрывается, и система зацикливает поток «на себя». Далее происходит плавный напуск воздушной смеси через редуктор в систему с помощью второго компрессора KNF (Германия) до стабилизации значений давления. После стабилизации давления и потоков, измеряемых на ротаметрах пермеата (секции обогащения) и ретентата (секции извлечения), проводится анализ состава газовой смеси с помощью газового хроматографа. Процесс разделения воздушной смеси осуществляется при перепаде давления 2 атмосферы.

Анализ состава газовых потоков, выходящих из секций извлечения и обогащения осуществляется с помощью газового хроматографа Хромос-1000 (Россия). Управление газохроматографической системой, а также сбор и обработку хроматографических данных производили с помощью программного обеспечения, поставляемого с хроматографом. Подробные условия хроматографического анализа представлены в таблице 1. В качестве газа-носителя используется гелий марки А (поставщик ООО "НИИ КМ") с чистотой 99,995%, поступающий из баллона с редуктором (БГД-25, Россия). Герметичность системы тестировали путем опрессовки на избыточное давление и поиском течи с использованием жидкого течеискателя—Snoop (Swagelok).

Таблица 1

Условия проведения хроматографического анализа	
Компонент ГХ	Характеристика
Детекторы	ДТП 120°C, 111mA
Хроматографические колонки	САа5А, 80/100 mesh, 2м × 3мм, нержавеющая сталь
Температура колонок	120 °C
Дозирующие петли	1 см ³ , 120°C
Газ носитель	He 99.9999 об. %, 20 см ³ /мин

Типовая хроматограмма компонентного состава газового потока выходящего из секции извлечения представлена на рисунке 2.

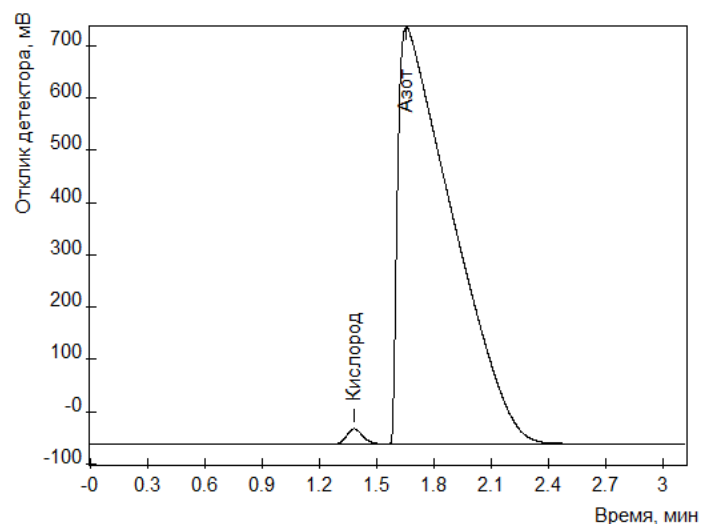


Рисунок 2 - Типовая хроматограмма компонентного состава секции извлечения

Обсуждение результатов.

В рамках работы были исследованы режимы работы мембранного каскада типа «непрерывная мембранная колонна» с различной величиной stage-cut (отношение потоков пермеата к питающему потоку). Также были получены хроматограммы с составами газовых потоков, выходящих из секций обогащения и извлечения. На основе полученных экспериментальных данных были построены зависимости концентраций N₂ и O₂ в секциях обогащения и извлечения от величины stage-cut.

Полученные зависимости на основе экспериментальных данных показывают, что чистота N₂ в секции извлечения равная 99,9% достигается при величине stage-cut равной 0,8 (рис.3). В секции обогащения наибольшая концентрация O₂ равная 54% наблюдается только в случае величины stage-cut равной 0,2 (рис.4). Также возможно увеличение чистоты и степени извлечения целевых продуктов за счет увеличения перепада давления и замены мембраны на более селективную по паре газов O₂/N₂.

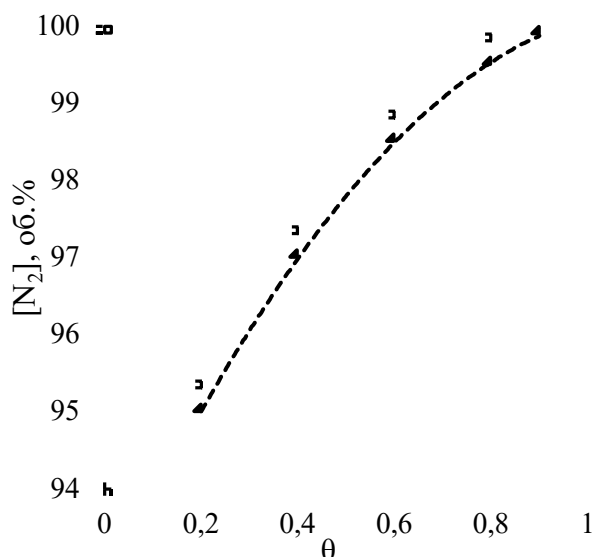


Рисунок 3- Зависимость концентрации N_2 в секции извлечения от величины stage-cut в мембранном каскаде типа «непрерывная мембранная колонна»

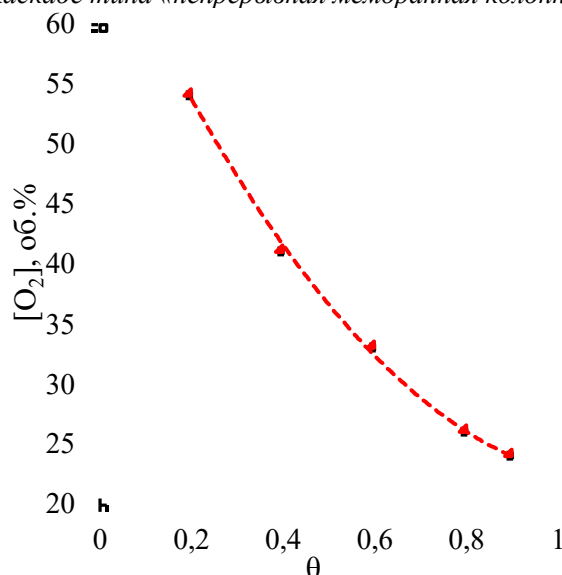


Рисунок 4 - Зависимость концентрации O_2 в секции обогащения от величины stage-cut в мембранном каскаде типа «непрерывная мембранная колонна»

Заключение

В рамках исследования были изучены режимы работы мембранного каскада типа «непрерывная мембранная колонна» для задач разделения воздуха. В ходе многопараметрического анализа процесса разделения воздуха на компоненты были получены зависимости концентрации целевого продукта от величины stage-cuta. Был сделан вывод о наиболее эффективных режимах работы мембранного каскада для данного типа мембран. При достаточно небольшом перепаде давления в 2 атмосферы и при различных значениях величины stage-cut мембранный каскад позволяет получить чистоту N_2 до 99.9 мол. % в секции извлечения и чистоту O_2 до 54 мол. % в секции обогащения. Также возможно повышение чистоты продукта при повышении перепада давления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках научного проекта по государственному заданию № FSSM-2023-0004

Список литературы

1. Chemical Looping Air Separation Using a Perovskite-Based Oxygen Sorbent: System Design and Process Analysis / Krzystowczyk E., Haribal V., Dou J., Li F. // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2021. – V. 9. – P. 12185–12195.

2. Chemmangattuvalappil N. G. Design of Polymeric Membranes for Air Separation by Combining Machine Learning Tools with Computer Aided Molecular Design / Cheun J. Y., Liew J. Y. L., Tan Q. Y., Chong J. W., Ooi J. // *Processes*. – 2023. – V. 11. – P. 2004.
3. Single-Column Cryogenic Air Separation: Enabling Efficient Oxygen Production With Rapid Startup and Low Capital Costs—Application to Low-Carbon Fossil-Fuel Plants / Cheng M., Verma P., Yang Z., Axelbaum R. L. // *Energy Conversion and Management*. – 2021. – V. 248. – P. 114773.
4. A Short Review on Pressure Swing Adsorption (PSA) Technology for Nitrogen Generation from Air / Kamin Z., Bahrin M. H. V., Bono A. // *AIP Conference Proceedings*. – 2022. – V. 2610. – P. 050006.
5. Air Separation by Polymer-Based Membrane Technology / Murali R. S., Sankarshana T., Sridhar S. // *Separation & Purification Reviews*. – 2013. – V. 42. – № 2. – P. 130–186.
6. Polymeric Membranes on Base of Polymethyl Methacrylate for Air Separation: A Review / Kianfar E., Cao V. // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – V. 10. – P. 1437–1461.
7. Experimental Study on the Performance of an Onboard Hollow-Fiber Membrane Air Separation Module / Tu Y., Zeng Y. // *Fluid Dynamics & Materials Processing*. – 2021. – V. 18. – P. 355–370.
8. Current and Future Trends in Polymer Membrane-Based Gas Separation Technology: A Comprehensive Review / Valappil R. S. K., Ghasem N., Al-Marzouqi M. // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2021. – V. 98. – P. 103–129.

УДК 66.081

Стасенко А.И., Каграманов Г.Г., Бланко-Педрахон А.М., Шибанов И.В..

Перспективы развития технологии извлечения лития из гидроминерального сырья

Стасенко Александра Игоревна – аспирант; aleksandra-stasenko@mail.ru

Каграманов Георгий Гайкович – д.т.н., профессор, заведующий кафедры;

Бланко-Педрахон Александра Максимовна – ассистент кафедры;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

Шибанов Игорь Владимирович – главный технолог;

ООО «7Тех»,

Россия, Москва, 125167, ул. Планетная, д. 11, помещ. 6/19 рм-1.

В тезисах рассмотрены существующие методы извлечения лития из гидроминерального сырья. В связи с возросшим интересом к теме извлечения лития из природных источников в мире ведется активный поиск оптимальной технологии, позволяющей осуществить этот процесс с максимальной эффективностью. Известно, что около 60% мирового запаса лития содержится в природных рассолах, исходя из этого интерес представляет разработка новых и совершенствование уже существующих методов извлечения лития. Наиболее перспективной технологией является прямое извлечение лития. В работе рассмотрены возможности сочетания разных методов, приведены их преимущества и недостатки, а также рассмотрена возможность использования технологии обратноосмотического концентрирования литиевых элюатов для повышения энергоэффективности процесса извлечения лития.

Ключевые слова: карбонат лития, рассол, технология DLE, сорбент, обратноосмотическое концентрирование, литий.

Prospects for the development of technology for extracting lithium from hydromineral raw materials

Stasenko A.I.¹, Kargramanov G.G.¹, Blanco-Pedrekxon A.M.¹, Shibarov I.V.²

¹ D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

² LLC «7Tech», Moscow, Russian Federation

The theses discusses the existing methods of lithium extraction from hydromineral raw materials. Due to the increased interest in the topic of lithium extraction from natural sources, the world is actively searching for the optimal technology that would allow this process to be carried out with maximum efficiency. It is known that about 60% of the world's lithium reserves are contained in natural brines, based on this, the development of new and improvement of existing lithium extraction methods is of interest. The most promising technology is direct lithium extraction. The paper considers the possibilities of combining different methods, provides their advantages and disadvantages, and also considers the possibility of using the technology of reverse osmosis concentration of lithium eluates to improve the energy efficiency of the lithium extraction process.

Key words: lithium carbonate, brine, DLE technology, sorbent, reverse osmosis concentration, lithium.

Последний век развития технологий показывает, что современный мир остро нуждается в качественном источнике энергии. В качестве такого источника выступает литий, который является составным компонентом литий-ионных аккумуляторов. Литий-ионные аккумуляторы широко используются в мобильных устройствах, ноутбуках и других портативных устройствах, также ими оснащены и современные электромобили. Ожидается, что темпы роста спроса на литий ежегодно будут составлять около 10% [1].

К природным источникам лития относят минеральные руды (сподумен, петалит, амблигонит, циннвальдит, лепидолит, полилитионит), где содержание лития достигает до 8-9% [2] и гидроминеральные ресурсы (рассолы), где содержание лития варьируется в пределах 900-7000 мг/л [3]. Известно, что 60% мирового запаса лития сосредоточено в рассолах соляных озер, и только около 28% содержится в литиевых рудах [4].

Мировые запасы рассолов, содержащие литий в основном сосредоточены в Аргентине, Чили и Боливии (крупнейший в мире солончак Уюни, запасы которого исчисляются в 21 млн тонн лития), значительными запасами лития также обладают и США, Конго, Китай, Бразилия, Австралия [5]. В РФ большие запасы лития содержат Завитинское месторождение в Восточном Забайкалье, Ковыктинское месторождение в Иркутской области, Колмозерское месторождение в Мурманской

области (по данным на 2021 год содержит 18,9% литиевых запасов в РФ и оценивается в 75 млн тонн руды) [6,7].

Экономическую выгоду извлечения лития из рассолов обуславливает низкое влияние на окружающую среду, а также меньшее потребление ресурсов (химических и энергетических) в сравнении с извлечением лития из руд. Основной товарной формой Li при извлечении его из гидроминеральных источников является гидроксид и карбонат.

Традиционным методом извлечения лития из рассолов является сочетание процессов испарения и карбонизации. Однако, у данного процесса есть существенные недостатки. Во-первых, основную стадию процесса составляет солнечное испарение в системе прудов-испарителей, которое в зависимости от климатических условий может составлять до 1,5 лет. Во-вторых, комбинация данных методов применима для рассолов, содержащих относительно высокие концентрации лития от 500 мг/л и более. В качестве альтернативы карбонизации для существенного сокращения продолжительности стадии испарения используют фосфатное осаждение [8]. Использование фосфатов обуславливают растворимостью фосфата лития, которая намного ниже, чем растворимость карбоната лития (0,027 г/100 мл H₂O и 1,3 г/100 мл H₂O при 25°C соответственно). Несмотря на преимущество данного метода, он также обладает низкой производительностью при использовании низкоконцентрированного рассола из-за наличия лимитирующей стадии - солнечного испарения.

Для исключения стадии солнечного испарения на данный момент используют сочетание разных технологий в основе которых лежат такие процессы как ионный обмен, сорбция, экстракция, а также мембранный электролиз. Основные способы извлечения лития из рассолов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Способы извлечения лития из гидроминерального сырья

Способ извлечения	Соответствующие химические реакции	Характеристики процесса
Испарение и последующая карбонизация	$2LiCl + Na_2CO_3 \rightarrow Li_2CO_3 + 2NaCl$	- метод используется при относительно высоком содержании лития в рассоле от 500 мг/л и характеризуется наличием продолжительной стадии солнечного испарения, составляющей 1-1,5 года
Испарение и последующее осаждение в виде фосфатов	$3LiCl + H_3PO_4 \rightarrow Li_3PO_4 + 3HCl$ $3Li_3PO_4 + 5Ca(OH)_2 \rightarrow$ $\rightarrow Ca_5(PO_4)_3 \cdot OH(осадок) + 9Li^+ + 9OH^-$	- осаждение таким способом позволяет сократить продолжительность солнечного испарения ввиду низкой растворимости фосфата лития, по сравнению с растворимостью карбоната лития (0,027 г/100 мл H ₂ O и 1,3 г/100 мл H ₂ O при 25°C соответственно) - процесс обладает низкой производительностью при использовании низкоконцентрированного рассола, поскольку основой метода является наличие предварительной стадии - солнечного испарения.
Ионный обмен	$LiCl + NaCl \cdot 2Al(OH)_3 \cdot nH_2O \rightarrow$ $\rightarrow NaCl + LiCl \cdot 2Al(OH)_3 \cdot nH_2O$	- преимущества ионного обмена заключаются в высокой селективности по литию и возможности ее регулирования посредством изменения pH, комплексообразования, а также высокой химической стойкостью

		ионообменных материалов. Метод позволяет достичь высоких степеней концентрирования. - недостатком является разрушение ионитов (например, под действием солнечного излучения) и необходимость их периодической регенерации, а также сложная переработка отработанных ионообменных материалов [9,10].
Сорбция	Сорбция: $\text{LiCl} \cdot 2\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot (m+p)\text{H}_2\text{O} + x\text{LiCl} \rightarrow \text{LiCl} \cdot 2\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot m\text{H}_2\text{O} + p\text{H}_2\text{O}$ Десорбция: $\text{LiCl} \cdot 2\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot m\text{H}_2\text{O} + p\text{H}_2\text{O} \rightarrow x\text{LiCl} + (1-x) \text{LiCl} \cdot 2\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot (m+p)\text{H}_2\text{O}$	- основным ресурсом для проведения данного процесса являются соединения, которые обладают селективностью по литию благодаря специальной кристаллической структуре (либо шпинельной, либо слоистой). Основой для данных сорбентов являются соединения алюминия, титана, марганца [11-13]. - сорбенты на основе алюминия представляют собой соединения гидроксида алюминия с интеркалированным в его слои литием $\text{LiCl}/\text{Al}(\text{OH})_3$. Они имеют сорбционные центры вдоль всей поверхности и более высокую сорбционную емкость в сравнении с ионообменными смолами [14]. - недостатком большинства существующих сорбентов является их нестабильность в кислотных и сильнощелочных растворах. Например, сорбенты на основе марганца стабильны в диапазоне pH 7–12, но при его превышении начинает происходить растворение Mn, а также изменение геометрических форм ионов, возникающих в результате перестроений электронов в определенные конфигурации (искажения Яна-Теллера). В этом отношении приоритетнее использование сорбентов на основе титана, которые обладают большей энергией связи в паре Ti-O, в сравнении с Mn-O [15].
Экстракция	$\text{Li}_{p-p}^+ + 2\text{ТБФ}_{\text{орг}} + \text{FeCl}_4^- \rightarrow \text{LiFeCl}_4 \cdot 2\text{ТБФ}_{\text{орг}}$ $\text{H}_{p-p}^+ + \text{LiFeCl}_4 \cdot 2\text{ТБФ}_{\text{орг}} \rightarrow \text{Li}_{p-p}^+ + \text{HFeCl}_4 \cdot 2\text{ТБФ}_{\text{орг}}$	- метод считается перспективным, так как он высокоселективен по отношению к литию в рассолах с высоким соотношением Mg/Li, обладает коротким временем достижения химического равновесия.

		- существенным недостатком процесса экстракции является необходимость использования концентрированного раствора соляной кислоты (6-9 моль/л) для отделения лития. - технология экстракции демонстрирует более высокую селективность по отношению к литию по сравнению с другими одновалентными ионами, такими как ионы натрия и калия. Однако, недостатком является то, что метод требует предварительного концентрирования рассола и дополнительной очистки от двухвалентных ионов (магния, кальция) [16].
Мембранный электролиз	Стадия 1: $\text{LiFePO}_4 \rightarrow \text{Li}^+ + \text{FePO}_4 + \text{e}^-$ Стадия 2: $\text{FePO}_4 + \text{Li}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{LiFePO}_4$	- метод позволяет извлекать литий из рассолов с высоким соотношением Mg/Li [17].

Самым перспективным на сегодняшний день является процесс прямого извлечения лития из рассола (Direct Lithium Extraction).

В процессе DLE литиевое гидроминеральное сырье (ЛГМС) перекачивают в блок селективного извлечения лития, который может быть адсорбционным, ионообменным или экстракционным и далее используют различное сочетание методов по доочистке полученного элюата и осаждению лития в товарной форме (рисунок 1). Ободеженный по литию рассол может быть повторно закачан в водоносные горизонты.

Для совершенствования процесса DLE интерес представляет метод обратноосмотического концентрирования литийсодержащих рассолов. Данный метод способен обеспечить 7-кратное концентрирование литийсодержащего рассола. Для существенного снижения энергозатрат на процесс получения соединений в целом рассматривается применение мембран обратного осмоса с возможностью выдерживать высокое рабочее давление (до 150 атм). Применяя данную ступень, можно достигнуть концентрации 10 г/л по литию в литиевом концентрате. Из раствора, сконцентрированного таким способом, можно высадить около 75-80% карбоната лития. Преимуществом метода обратноосмотического концентрирования является его энергоэффективность. Так, например, энергозатраты при использовании технологии многоступенчатого обратного осмоса составляют 1,5 – 2,5 кВт·ч на тонну дистиллята (пресного пермеата), в то время как парокompректорные крупнотоннажные аппараты затрачивают от 30- до 70 кВт·ч энергии на 1 тонну.

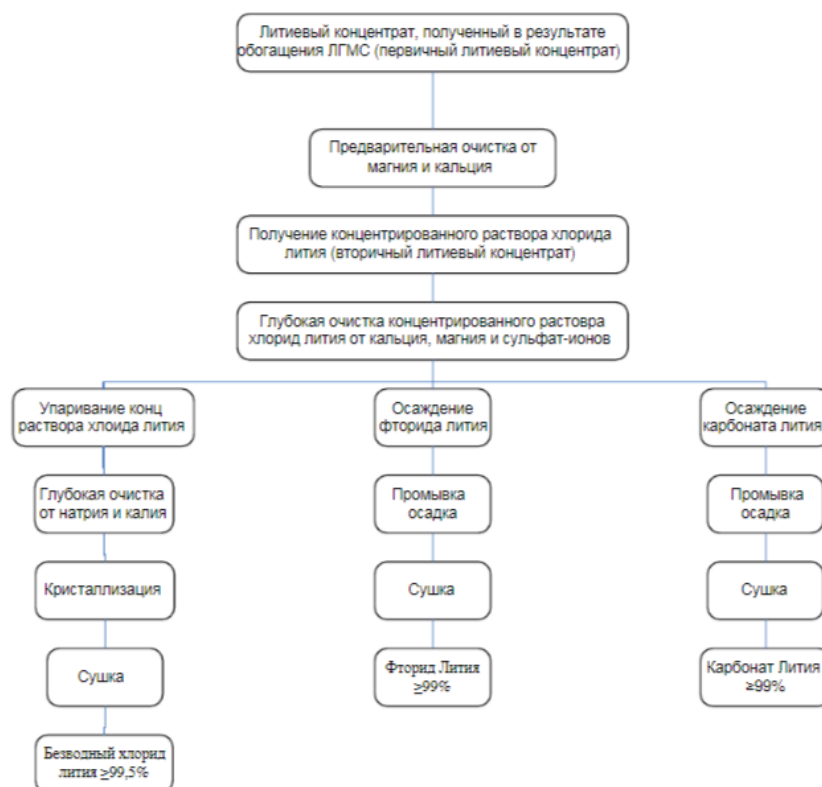


Рисунок 1 - Технологическая схема переработки литиевого концентрата, полученного в результате обогащения литиевого гидроминерального сырья [18]

Заключение

Рассмотрены основные процессы извлечения лития из гидроминерального сырья. С точки зрения экономической наиболее перспективной технологией на данный момент является прямое извлечение лития. Показано, что в рамках технологии DLE интерес представляет сочетание процессов сорбции и обратноосмотического концентрирования, который, учитывая свои конкурентные преимущества может приводить к значительному снижению эксплуатационных затрат.

Список литературы

1. Kim, T., Song, W., Son, D.-Y., Ono, L. K., & Qi, Y. Lithium-ion batteries: outlook on present, future, and hybridized technologies. // Journal of Materials Chemistry A., 2019, 7, pp. 2942–2964
2. Минеральные ресурсы России. Вып. 3: Черные и чернoleгирующие металлы, цветные металлы, редкие металлы, рассеянные элементы. – М.: Научный мир, 1997.
3. Kogel, J.E., Trivedi, N.C., Barker, J.M., Krukowski, S.T. Industrial Minerals and Rocks: Commodities, Markets and Uses. // 7th Ed. Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc., Littleton, USA, 2006, 1548 p.
4. Волкова Н. И., Владимиров А. Г., Исупов В. П., Мороз Е. Н.. Литиевые соляные озера Южной Америки и Центральной Азии // Химия в интересах устойчивого развития, 2012, Т. 20, № 1, С. 21-26.
5. Vikström, H., Davidsson, S., Höök, M., Lithium availability and future production outlooks // Applied Energy, 2013, V. 110, pp. 252-266.
6. Справка подготовлена ФГБУ «ВСЕГЕИ» в рамках выполнения Государственного задания Федерального агентства по недропользованию от 14.01.2021 г. № 049-00016-21-00
7. Коротков В.В. Информационный интернет-бюллетень природные ресурсы атомная промышленность (U, Th, Zr), черная (Fe, Cr, Mn, Ti, CaF₂) и цветная (Cu, Mo, W, Ni, Pb, Zn, Nb-Ta, Sn, Al, Be, В) металлургия (Au, Ag, Pt, алмазы), № 208, 2020.
8. Patent US9598291B2. Method for Manufacturing Lithium Hydroxide and Method Using Same for Manufacturing Lithium Carbonate. Chon, U., Lee, I. C., Kim, K. Y., Han, G.-C., Song, C. H., Jung, S. R. 2017.
9. Patent US4347327A. Recovery of Lithium from Brines. Lee, J. M.; Bauman, W. C. 1982.

10. Patent US4461714A. Method of Making Crystalline 2-Layer Lithium Aluminates in Ion Exchange Resins. John L. Burba, I. 1984.
11. Patent US6280693B1. Composition for the Recovery of Lithium Values from Brine and Process of Making/Using Said Composition. Bauman, W. C.; John L. Burba, I. 2001.
12. Patent US8637428B1. Lithium Extraction Composition and Method of Preparation Thereof. Harrison, S.; Sharma, C. V. K.; Viani, B. E.; Peykova, D. 2014.
13. Patent US20160317998A1. Method of Preparing an Adsorbent Material Shaped in the Absence of Binder and Method of Extracting Lithium from Saline Solutions Using Said Material. Boualleg, M.; Lafon, O.; Burdet, F. A. P.; Soulairol, R. C. J. R. 2016.
14. Менжерес Л.Т., Рябцев А.Д., Мамылова Е.В. Селективный сорбент для извлечения лития из хлоридных высокоминерализованных рассолов // Известия Томского политехнического университета. 2004, Т. 307, № 7, С. 76-80.
15. Chitrakar, R., Makita, Y., Ooi, K., Sonoda, A. Magnesium-Doped Manganese Oxide with Lithium Ion-Sieve Property: Lithium Adsorption from Salt Lake Brine // Bulletin of the Chemical Society of Japan, 2013, 86 (7), pp. 850–855.
16. Bai, R., Wang, J., Wang, D., Zhang, Y. and Cui, J. Selective separation of lithium from the high magnesium brine by the extraction system containing phosphatebased ionic liquids // Separation and Purification Technology. 2021. 274(2), 119051. [https://doi.org/ 10.1016/j.seppur.2021.119051](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119051)
17. Xuheng L., Xingyu Ch., Lihua H., Zhongwei Zh. Study on extraction of lithium from salt lake brine by membrane electrolysis // School of Metallurgy and Environment. 2015, 376, pp. 35–40
18. Коцупало, Н.П. Перспективы получения со-соединений лития из природных хлоридных рассолов / Н.П. Коцупало // Химия в интересах устой-устойчивого развития. – 2001. – Т. 9. – С. 243–253.

УДК 66.081.6–278

Сысоев А.А., Атласкин А.А., Атласкина М.Е., Крючков С.С., Смородин К.А., Воротынцев И.В.

Получение полимерной пленки из полиэфиримида и возможность ее использования для выделения гелия с помощью мембранного газоразделения

Сысоев Александр Андреевич – аспирант 1-го года обучения, лаборант химического анализа shura.sys@yandex.ru;

Атласкин Артем Анатольевич – к.т.н., старший научный сотрудник;

Атласкина Мария Евгеньевна – к.т.н., старший научный сотрудник;

Крючков Сергей Сергеевич – аспирант 4-го года обучения, младший научный сотрудник;

Смородин Кирилл Александрович – аспирант 3-го года обучения, инженер-исследователь;

Воротынцев Илья Владимирович – д.т.н., профессор кафедры;

ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева»,

Россия, Москва, 125047, Миусская площадь, дом 9.

В тезисах рассмотрена проблема получения, потребления и утилизации чистого гелия. Сырьевая база запасов гелия истощается, а объемы потребления и цены на него растут. Использование мембранной технологии для задач получения чистого гелия не только высокоэффективно, но и экономически выгодно.

Ключевые слова: гелий, полимерная пленка, плоская мембрана, мембранное газоразделение, мембранная технология

Production of a polymer film from polyetherimide and the possibility of its use for the extraction of helium using membrane gas separation

Sysoev A.A., Atlaskin A.A., Atlaskina M.E., Kryuchkov S.S., Smorodin K.A., Vorotynstev I.V.

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

The theses discusses the problem of obtaining, consuming and utilizing pure helium. The raw material base of helium reserves is depleted, while consumption volumes and prices for it are growing. The use of membrane technology for the tasks of obtaining pure helium is not only highly effective, but also economically advantageous.

Key words: helium, polymer film, flat membrane, membrane gas separation, membrane technology.

Введение

Гелий – уникальный химический элемент, который представляет из себя инертный и негорючий газ с малым размером молекулы и с одной из самых низких температур кипения из всех известных веществ. Эти свойства делают незаменимым и полезным его применение во многих областях промышленности. Среди наиболее востребованных областей применения можно выделить криогенику, аэростатику, электронику, волоконная оптику, обнаружение утечек газа и газовую хроматографию (Рис. 1). Гелий – второй по легкости и второй по распространенности элемент во Вселенной. Относится к невозобновляемым ресурсам, поскольку запасы его источников конечны, а сам он после использования покидает атмосферу Земли. Природный газ в настоящее время является преобладающим источником для экономически выгодного получения гелия [1]. Наличие и концентрация гелия варьируются в зависимости от глубины, местоположения и геологии добывающего района. Некоторые газовые месторождения содержат до 9,8 об.% гелия (Аризона, США). В среднем же, коммерческие месторождения природного газа содержат от 0,2 до 0,3 об.% гелия. С точки зрения экономики, выгодным и рациональным ресурсом для добычи является природный газ с содержанием гелия более 0,3 об.%. Гелий получается, как побочный продукт в процессе переработки природного газа и извлекается, и очищается путем объединения энергоемких процессов криогенной дистилляции и адсорбции при переменном давлении. Технологическая линия по производству гелия не может быть автономной, она должна быть интегрирована в существующий процесс по переработке природного газа.

Существующая на данный момент проблема связана не только с добычей гелия, но с его потреблением и утилизацией. Уже сейчас современные потери гелия при утилизации гелийсодержащих газов резко превышают объемы его потребления и производства. Ныне в мире добывается примерно 150–170 млн. м³ гелия, попутно утрачивается еще около 600–650 млн. м³. Уже на протяжении полувека наблюдается устойчивый рост годового потребления гелия в мире на 6-7 %, но сырьевая база гелия при этом ограничена и невосполнима, к тому же, гелию во многих областях применения просто нельзя найти

замены (Таблица 1). Кроме того, вместе с ростом объемов потребления неминуемо растет цена и повышается себестоимость. Если в 2010 году цена на 1 м³ составляла 2,5–3 \$, то в 2020 году цена за 1 м³ была 30–32 \$. Совокупность этих двух процессов – устойчивое расширение областей потребления гелия во всем мире при ограниченности его ресурсов и ускоренной их попутной потере при утилизации гелийсодержащих природных газов в качестве энергосырья вызывает естественную настороженность и обеспокоенность среди мировых ученых.

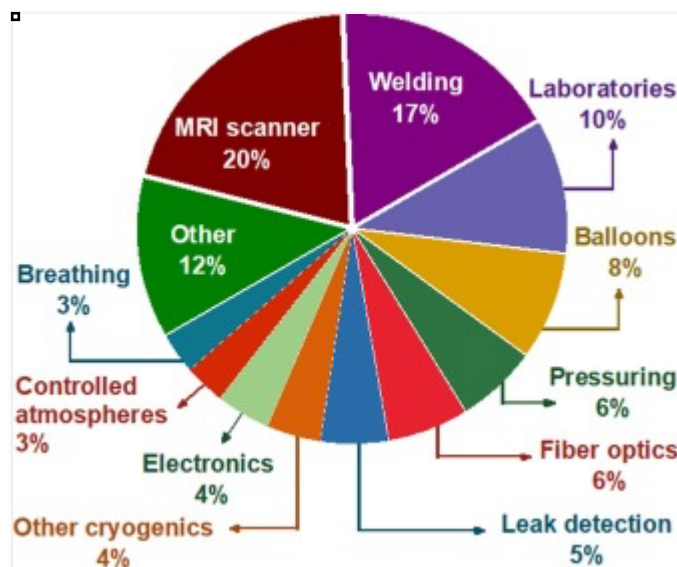


Рисунок 1 - Структура мирового потребления гелия.

Одним из примеров нерационального использования гелия является его использование для нужд баллонного воздухоплавания, или лифтинга. Около 10 % всего добываемого гелия выступает в качестве альтернативного вида топлива для заправки аэростатов, метеозондов, дирижаблей. Вообще, именно эта отрасль явилась пионерской в промышленном использовании и производстве гелия. Все это возможно благодаря тому, что подъемная сила гелия почти равна водородной (92 % от нее), но гелий, при этом, совершенно безопасен и негорюч, в отличие от водорода. Однако существует и обратная сторона такого применения гелия. После эксплуатации в летательных аппаратах гелий «сливается» и утилизируется в виде отработанного топлива, тем самым лишая промышленность ценного продукта и сокращая его запасы. Одним из способов решения данной проблемы может послужить его регенерация с применением мембранных технологий. Учеными уже была продемонстрирована техническая осуществимость процесса мембранного восстановления гелия из природного газа [2]. Процессы мембранного разделения газа широко исследованы, а также технически и экономически более выгодны, поскольку оборудование для проведения таких процессов обладает компактными размерами и низкой металлоемкостью, процессы легко масштабируемы и требуют минимального аппаратного оформления и обслуживания.

Таблица 1

Динамика мирового потребления гелия, (млн. м³/год).

Страны	Потребление по годам, млн. м ³							
	1982	1987	1992	1994	1998	2000	2010	2020
США	24,6	49,3	65,2	69,2	84,2	89,6	110	180-200
Страны Европы	7,4	9,8	17,1	18,8	25	26	40	70-80
Канада	-	-	-	-	2,5	3	25	30-35
Россия	3,6	7,8	3,8	-	<1	<1	5-10	10-15
Другие страны	2,8	2,0	6,5	8,2	6,3	7,0	12-17	40-45
Всего	40,3	73,5	102,7	106,5	133	140	210-220	380-410

Экспериментальная часть

Первостепенной задачей для реализации процессов мембранного газоразделения является выбор полимерного материала, из которого непосредственного изготавливается мембрана. В контексте стоящей задачи по регенерации гелия из отработанного топлива воздухоплавательных аппаратов для изготовления мембраны может быть выбрана полимерная композиция на основе полиэфиримида или полиимида [3]. Данная работа посвящена разработке полимерного состава и изготовлению на его основе плоской мембраны, пригодной для дальнейшего применения в мембранном разделении гелия.

Для синтеза полимерного раствора использовали полиэфиримид марки «Ultem™ 1000» (PEI, $M_w = 66$ kDa, $M_n = 39,5$ kDa). В качестве растворителя выступали N-метил-2-пирролидон (NMP, $T_k = 204$ °C, purity > 99 %) и тетрагидрофуран (THF, $T_k = 66$ °C, purity > 99 %). PEI добавляли порциями в термостатированную при 60 °C колбу, заполненную NMP. После полного растворения PEI в NMP добавили весь объем второго растворителя THF. Раствор выдерживали в течение 24 часов при 60 °C. Окончательный состав раствора (по масс. %) был следующим: NMP – 60 %, THF – 20 %, PEI – 20 %. Получения гомогенный вязкий раствор желтого цвета выдерживали при комнатной температуре в течение 12 часов с последующей дегазацией с применением ультразвуковой ванны.

Плоскую мембрану изготавливали по методу инверсии фаз (NIPS): для этого нужное количество полимерного раствора выливали на предварительно очищенную зеркальную поверхность и с помощью аппликаторного ножа заданной толщины (50, 75, 100 мкм) формировали плоскую пленку. Затем зеркало помещали в осадительную ванну с дистиллированной водой комнатной температуры. После отслоения от зеркала мембрана несколько раз выдерживалась в воде для частичного удаления растворителя. Для полного удаления растворителя мембрана вымачивалась последовательно сначала в ванне с гексаном, а затем в ванне с изопропиловым спиртом. Далее мембрану сушили при комнатной температуре и атмосферном давлении в течение 3 суток, поскольку повышенная температура оказывает негативный эффект на прочностные характеристики мембраны (Схема 1).

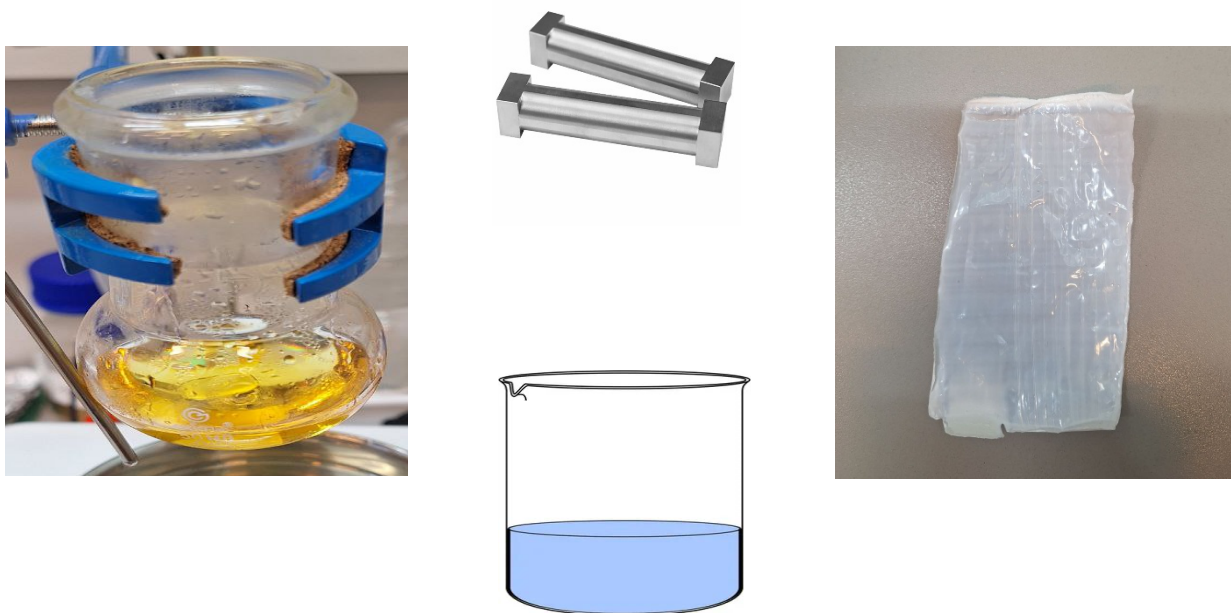


Схема 1 - Получение плоской мембраны методом NIPS.

Полученная плоская полимерная мембрана будет изучена в будущем на предмет ее физико-химических свойств (СЭМ.), а с помощью методов ГХ будут исследованы ее газотранспортные характеристики (показатели проницаемости и селективности). На основе этих данных можно будет сделать несколько очень важных выводов. Первый вывод о влиянии используемых реагентов на внутреннюю структуру полимерной пленки, наличие и типу свободных пор, морфологию поверхности. А второй вывод о дальнейшей применимости данного полимерного состава для формирования из него уже полых волоконных систем и изготовления на основе них мембранных

модулей, пригодных для извлечения и регенерации гелия из отработанного топлива воздухоплавательных аппаратов.

Заключение

В настоящей работе представлена методика изготовления плоской полимерной мембраны из полиэфиримида. Мембрана изготавливалась с применением технологии NIPS. В качестве растворителя в данном методе использовалась смесь NMP и THF, причем NMP выступал в роли сильного по растворяющей способности и менее летучего растворителя, а THF – в роли растворителя средней силы, способного быстрее «уходить» из структуры пленки и образовать поры внутри нее. В качестве коагулянта была выбрана вода как компонент, обладающий высоким химическим сродством к заявленным растворителям. Изучение физико-химических свойств и газотранспортных характеристик полученной мембраны в будущем поможет в составлении тройной фазовой диаграммы для полимерного раствора, на основе которого могут быть изготовлены полые волокна для задач разделения гелия из источников его промышленного применения.

Список литературы

1. Recent developments in polyetherimide membrane for gas separation / Y. Alqaheem and A. Alomair // Journal of the Chinese Chemical Society. – 2019. – V. 66. – № 1. – P. 1–7.
2. A novel surface modified polyetherimide hollow fiber membrane for gas-liquid contacting processes / Gh. Bakeri, T. Matsura, A.F. Ismail and D. Rana // Separation and Purification Technology. – 2012. – V. 89. – № 7. – P. 160–170.
3. Correlation between performances of hollow fibers and flat membranes for gas separation / X.Y. Chen, S. Kaliaguine and D. Rodrigue // Separation and Purification Reviews. – 2017. – V. 47. – № 1. – P. 66–87.

УДК 66.087.97

Таха Б.С., Алексеева Н.В.

Вольтамперная характеристика электродиализного разделения водных растворов в присутствии микрочастиц активированного угля

Таха Биляль Саад – аспирант; bilalsaad_t@yahoo.com.

Алексеева Надежда Вячеславовна – к.т.н., доцент кафедры;

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»,

Россия, Тамбов, 392000, улица Советская, 106/5, помещение 2.

В тезисах рассмотрены процессы электродиализного разделения с точки зрения энергетических затрат, способы снижения энергозатрат при разделении водных растворов, содержащих неорганические и органические компоненты, эффективность диспергирования микрочастиц активированного угля в разделяемый раствор.

Ключевые слова: электродиализ, вольтамперная характеристика, активированный уголь, микрочастицы.

The volt-ampere characteristic of electro dialysis separation of aqueous solutions in the presence of activated carbon microparticles

Taha B.S.T., Alekseeva N.V.

Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation

The theses discusses electro dialysis separation processes in terms of energy consumption, methods for reducing energy costs during the separation of aqueous solutions containing inorganic and organic components, and the efficiency of dispersing activated carbon microparticles in the separating solution.

Key words: electro dialysis, volt-ampere characteristic, activated carbon, microparticles.

Введение

Вольтамперная характеристика электродиализа является важным инструментом для анализа и управления процессом разделения ионов. Она позволяет определить оптимальные условия для проведения электродиализа, минимизировать потери электроэнергии и повысить эффективность процесса [1]. Понимание этой характеристики необходимо для разработки новых технологий и улучшения существующих систем в области очистки воды, химической и пищевой промышленности.

Причинами повышения электрического сопротивления электродиализного пакета являются явления концентрационной поляризации как в межмембранном пространстве, так и на поверхности электродов [2], загрязнение поверхности мембран органическими составляющими обрабатываемого раствора [3], локальные изменения концентрации ионов в растворе [4]. Для снижения омического сопротивления и повышения энергетической эффективности электродиализного разделения используются различные методы:

- применение турбулизаторов потока в межмембранном пространстве [5];
- модификация поверхности мембран [6];
- различная геометрия межмембранных каналов [7];
- использование пульсирующего режима электрического тока [8].

Промышленные сточные воды химических предприятий, нуждающиеся в очистке, как правило имеют известный состав и содержат органические и неорганические компоненты. Получение очищенной воды из таких растворов осложнено высокой концентрацией растворенных компонентов. Применение электродиализного разделения как одной из стадии технологии очистки сточных вод является энергетически эффективным [9]. Негативным явлением остается присутствие в растворе органических компонентов, приводящих к загрязнению поверхности мембран, что можно снизить предварительной адсорбционной обработкой раствора [10].

Адсорбция органических водорастворимых компонентов из водных растворов наиболее часто осуществляется активированным углем, который может быть применен в виде гранул, волокон, порошка или тканевого материала. Благодаря своей пористой структуре активированный уголь характеризуется высокой эффективностью при адсорбции хлора, хлораминов, органических соединений, пестицидов и фенолов [11]. Для обработки жидкости наиболее эффективно в использовании гранулы и порошок. Наиболее распространенным сырьем при изготовлении активированных углей для очистки водных растворов являются кокосовая скорлупа и древесина

березы. На территории Российской Федерации актуальным сырьем является древесина березы и получаемый из нее активированный уголь марки БАУ [12].

Целью исследования является изучение влияния микрочастиц порошка активированного угля, добавленных в разделяемый электродиализом водный раствор, на вольтамперную характеристику мембранного пакета, что позволит оценить энергетическую эффективность предлагаемого способа разделения.

Экспериментальная часть

Исследование электродиализного разделения проведено на лабораторной электродиализной установке (рис. 1). Электродиализный пакет состоит из 9 чередующихся мембран (5 катионообменных и 4 анионообменных) площадью 24 см^2 , межмембранное расстояние – 1 мм, скорость течения растворов в камере ячейки – 0,16 м/с. Блок электрического питания включает в себя источник постоянного тока, амперметр и вольтметр. Аппарат функционирует в проточном режиме. Электродный раствор – водный раствор хлорида натрия концентрацией 5 г/л подается в каждую камеру отдельно со скоростью 0,23 м/с.

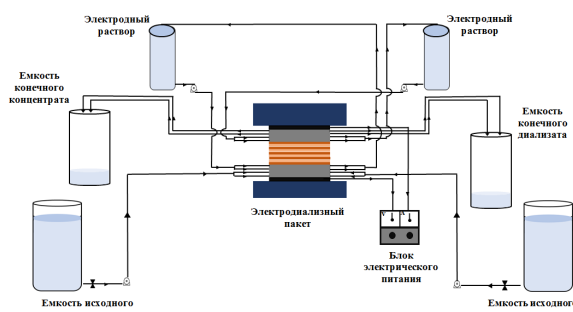


Рисунок 1 – Схема экспериментальной электродиализной установки

Разделению подвергались растворы различного состава, моделирующие водные растворы, содержащие только неорганические компоненты, неорганические и органические компоненты, и растворы с добавлением микрочастиц порошка активированного угля (таблица 1).

Таблица 1

Состав разделяемых растворов

Раствор	Обозначение	Компонент	Концентрация, г/л
№ 1	NaCl	Хлорид натрия	5
№ 2	NaCl+AC	Хлорид натрия	5
		Активированный уголь	1
№ 3	NaCl+Phenol	Хлорид натрия	5
		Фенол	1
№ 4	NaCl+Phenol+AC	Хлорид натрия	5
		Фенол	1
		Активированный уголь	1

Использованный активированный уголь – микрочастицы порошка активированного березового угля размером 0,09...0,2 мм приготовленные измельчением дробленого угля БАУ-А (ГОСТ 6217-74). Микрочастицы угля находятся в растворе во взвешенном состоянии, так как скорость движения потока значительно превышает скорость осаждения частиц.

Результаты исследований представлены на рис. 2. Присутствие органического водорастворимого компонента – фенола в растворе увеличивает омическое сопротивление электродиализного аппарата, а присутствие микрочастиц активированного угля – уменьшает.

Особенностью вольтамперных характеристик рассматриваемых систем является одинаковость значений сопротивления на начальном этапе исследования при невысоких значениях плотности электрического тока, то есть в условиях допредельного режима электродиализа. Следует отметить,

что предельное состояние и величина предельной плотности тока зависят от типа мембраны, раствора, концентрации растворенных компонентов и скорости движения раствора в камерах аппарата [13].

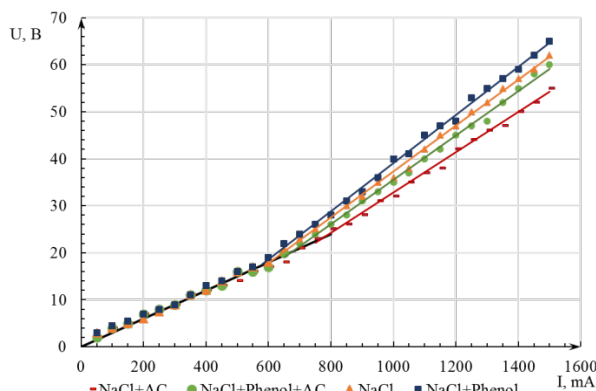


Рисунок 2 - Вольт-амперная характеристика электродиализного пакета при разделении водных растворов различного состава

Вследствие изменения концентрации раствора по ходу его движения в аппарате предельное состояние в камерах аппарата наступает не одновременно, тем не менее, на графиках явно наблюдается увеличение омического сопротивления мембранного пакета при различных величинах силы тока для разных растворов (таблица 2). Присутствие микрочастиц активированного угля увеличивает область энергетически эффективного допредельного режима электродиализа как для раствора, содержащего только неорганические компоненты, так и для раствора, содержащего неорганические и органические компоненты. Величины силы тока и соответствующие им плотности тока, ограничивающие область энергоэффективного применения электродиализа представлены в таблице 2.

Таблица 2

Величина предельного эффективного тока для различных растворов

Раствор	Сила тока, мА	Плотность тока, А/м ²	Коэффициент превышения
NaCl	600	250	1
NaCl+AC	740	308	1,23
NaCl+Phenol	560	233	0,93
NaCl+Phenol+AC	650	270	1,08

Так, раствор хлорида натрия с добавлением микрочастиц активированного угля возможно разделять при 740 мА при этом напряжение на ячейке составит 23 В. Раствор хлорида натрия без угля при 740 мА дает напряжение 25 В, что в пересчете на электрическую мощность на 8% больше.

Заключение

Добавление в разделяемый электродиализом раствор микрочастиц активированного угля позволяет увеличить область значений электрического тока в допредельном режиме разделения, что позволяет получить снижение энергозатрат на процесс. Полученный эффект наблюдается и для растворов, содержащих органические водорастворимые компоненты. Дополнительно к экономическому эффекту организация процесса разделения в присутствии активированного угля позволяет организовать одновременно два процесса: электродиализ неорганических компонентов и адсорбцию органических, что может привести к снижению загрязнения поверхности мембран при длительной эксплуатации.

Список литературы

1. Елисеева Т.В., Харина А.Ю. Особенности вольт-амперных и транспортных характеристик анионообменных мембран при электродиализе растворов, содержащих алкилароматическую аминокислоту и минеральную соль // Электрохимия. 2015. Т. 51. № 1. С. 74.
2. Танака Е. Массоперенос в пограничном слое и в ионообменной мембране: механизм концентрационной поляризации и диссоциации воды // Электрохимия. 2012. Т. 48. № 7. С. 739.

3. Фаулинг и деградация мембран в мембранных процессах / П.Ю. Апель, С. Велизаров, А.В. Волков, Т.В. Елисеева, В.В. Никоненко, А.В. Паршина, Н.Д. Письменская, К.И. Попов, А.Б. Ярославцев // Мембраны и мембранные технологии. 2022. Т. 12. № 2. С. 81-106.
4. Васильева В.И. Концентрационные поля и явления переноса в электромембранных системах. Автореф. дис. ... докт. хим. наук. Воронеж, 2008.
5. Развитие мембранных технологий на основе электродиализа в России / В.И. Заболоцкий, Н.П. Березина, В.В. Никоненко, А.А. Шудренко // Наука Кубани. 2010. № 3. С. 4-10.
6. Родзик И.Г., Колзунова Л.Г. Влияние способа модификации сульфокатионитовой мембраны на избирательность электродиализного переноса катионов // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2011. № 5 (159). С. 106-111.
7. Оптимизация гидродинамического режима в камерах проточного электромембранного аппарата / А.А. Филимонова, А.А. Чичиров, А.В. Печенкин, Н.Д. Чичирова // Мембраны и мембранные технологии. 2023. Т. 13. № 1. С. 15-22.
8. Исследование электродиализа при пульсирующем токе / В.И. Быков, А.А. Титов, А.А. Свитцов, С.И. Ильина, В.Я. Логинов, Л.В. Равичев // Химическая промышленность сегодня. 2024. № 3. С. 30-35.
9. Джубари М.К., Алексеева Н.В., Балабанова М.Ю. Сочетание обратного осмоса и электродиализа для улучшения рекуперации воды в промышленных сточных водах // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2020. Т. 82. № 4 (86). С. 227-235.
10. Юстратов В.П. Физико-химические и экологические аспекты утилизации органоминеральных сточных вод предприятий химической промышленности. Автореф. дис. ... докт. хим. наук. Владивосток, 2007.
11. Шаймухаметова Г.Ф. Адсорбция органических соединений на углеродных адсорбентах и их модифицированных образцах. Автореф. дис. ... канд. хим. наук. Уфа, 2016.
12. Юрьев Ю.Л. Получение и использование березового активного угля для доочистки питьевой воды // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2020. № 3 (375). С. 169-175.
13. Определение граничных условий токовых режимов электродиализного разделения / В.В. Маслова, А.А. Титов, С.И. Ильина, Л.В. Равичев // В сборнике: Интенсификация теплообменных процессов, промышленная безопасность и экология. Материалы VII Всероссийской студенческой научно-практической конференции. Казань, 2024. С. 375-379.

УДК 66.081.6-278

Токарев П.О., Грудковская В.К., Козлова А.А., Шалыгин М.Г., Грушевенко Е.А.

Разработка высокоселективной мембраны на основе сшитого полидецилметилсилоксана для рекуперации паров органических растворителей

Токарев Павел Олегович – аспирант; tokarevPO@ips.ac.ru.

Грудковская Валентина Константиновна – студент;

Козлова Алина Александровна – к.х.н., научный сотрудник;

Шалыгин Максим Геннадьевич – к.х.н., и.о. заведующего лабораторией, ведущий научный сотрудник;

Грушевенко Евгения Александровна – к.х.н., старший научный сотрудник;

ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени «Институт нефтехимического синтеза имени А. В. Топчиева» Российской академии наук, Россия, Москва, 119991, Ленинский проспект, 29.

В тезисах рассматривается мембранная рекуперация летучих органических соединений из парогазовых смесей с использованием полидецилметилсилоксана. Исследуется влияние различных сшивающих агентов на сорбционные и газотранспортные характеристики полимеров. Сшивка коротким агентом приводит к минимальному набуханию и высокой селективности, тогда как с винил-терминированным полидиметилсилоксаном показывает высокую проницаемость, но низкую селективность. Наиболее эффективной для выделения растворителей является мембрана, сшитая комбинацией агентов, так как она сочетает селективность и проницаемость.

Ключевые слова: мембранная рекуперация, летучие органические соединения, полидецилметилсилоксан, сшивающие агенты

Development of a highly selective membrane based on cross-linked polydecylmethylsiloxane for organic solvent vapour recovery

Tokarev P.O., Grudkovskaya V.K., Kozlova A.A., Shalygin M.G., Grushevenko E.A.

Federal State Budgetary Institution of Science "A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis" of the Russian Academy of Sciences, 29 Leninsky Prospect, Moscow, 119991, Russia.

This thesis discusses the membrane recovery of volatile organic compounds from vapour-gas mixtures using polydecylmethylsiloxane. The effect of different cross-linking agents on the sorption and gas transport properties of the polymers is investigated. Crosslinking with a short agent results in minimal swelling and high selectivity, whereas vinyl-terminated polydimethylsiloxane shows high permeability but low selectivity. The most effective membrane for solvent separation is the one cross-linked with a combination of agents, as it combines selectivity and permeability.

Key words: membrane recovery, volatile organic compounds, polydecylmethylsiloxane, cross-linking agents

Введение

Мембранная рекуперация летучих органических соединений (ЛОС) из парогазовых является наиболее оптимальной технологией с точки зрения ресурсосбережения. Коммерческие мембраны для разделения парогазовых смесей изготавливают на основе полисилоксанов, поскольку данные полимеры высокой избирательной проницаемостью паров ЛОС и стабильностью в них за счет сшитой структуры. Однако существующие мембранные материалы либо недостаточно селективные, либо теряют селективность в ЛОС-содержащей смеси за счет набухания в тонком селективном слое. В классе полисилоксанов с точки зрения селективности в отношении конденсирующихся органических компонентов наиболее привлекательным является полидецилметилсилоксан (C10) [1]. Тем не менее требуется стабилизация свойств данного полимера при переходе от индивидуальных компонентов к парогазовым смесям. В данной работе изучена взаимосвязь между природой сшивающего агента (СА) и разделительными свойствами полученных мембран. Исследована взаимосвязь структуры полученных C10 и набухания пленок полимеров в органических растворителях, их проницаемость, а также разделительная способность в отношении парогазовых (ЛОС/азот) смесей.

Экспериментальная часть

Синтез сшитых полимеров C10 проводился по методу одностадийного синтеза *in situ*, разработанного в ИНХС РАН, в основе которого лежит реакция гидросилилирования (рис. 1) [2]. В данной работе C10 сшивали тремя типами сшивок: короткий сшивающий агент 1,7-октадиен (C10-OD); силоксановый сшивающий агент винил-терминированный полидиметилсилоксан (ПДМС) с молекулярной массой 25 000 г/моль (C10-Sil25) и их комбинация 1,7-октадиен с ПДМС (C10-Sil25-

OD). Для оценки сорбционных свойств и структуры сшитых мембран измеряли сорбцию (S), набухание (Q) были исследованы путем измерения изменения геометрических размеров и массы пленок после длительной экспозиции в толуоле, н-октане, изооктане и бутилацетате. Кажущуюся плотность сшивки (γ_e) рассчитывали по уравнению Флори-Рейнара. Она характеризует среднее число звеньев цепи между поперечными связями и способность поперечных связей различной природы ограничивать набухание сшитых полидецилсилоксанов. Плотность (ρ) измеряли по методике гидростатического взвешивания [3]. Плотность сшивки (γ_e) рассчитывалась на основе полученных данных о набухании полимера в толуоле [4]. Для определения газотранспортных свойств мембран определялась проницаемость и селективность органических растворителей в парогазовой смеси.

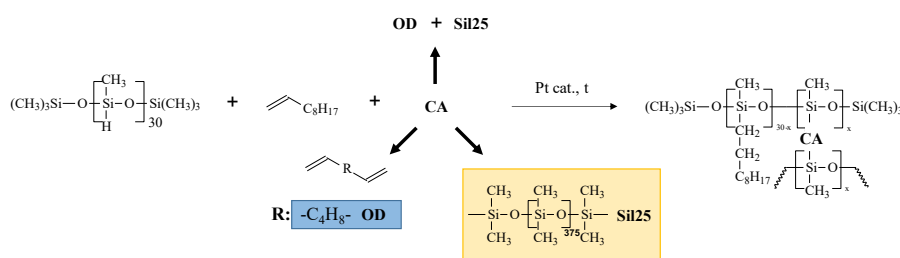


Рисунок 1 - Схема полимерно-аналогового превращения ПМГС в сшитый C10.

Для измерения проницаемости паров органических растворителей мембрану помещали в ячейку проточного типа и подавали в неё парогазовый поток, полученный продувкой газа-носителя через барботер с исследуемым компонентом в жидком виде. Анализ содержания паров в потоках пермеата и ретентата проводили на газовом хроматографе Shimadzu GC-8A.

Сорбция и набухание образцов сшитых C10 в индивидуальных растворителях (толуол, н-октан, изооктан и бутилацетат) представлены на рисунке 2. Показано, что природа сшивки оказывает существенное влияние на сорбционные свойства. Так, мембранный материал, сшитый коротким и жестким 1,7-октадиеном, демонстрирует наименьшие значения сорбции и набухания по всем растворителям, что обосновано формированием жесткой и плотной структуры полимера ($\rho = 0,99$; $\gamma_e = 3,14$). Сшивка винил-терминированным ПДМС, напротив, приводит к формированию рыхлую структуру ($\rho = 0,93$; $\gamma_e = 1,38$), для которой характерны наибольшие показатели сорбции и степени набухания. Комбинированная сшивка показывает на 20% большую плотность сшивки, чем сшивание силоксаном, при сопоставимой плотности ($\rho = 0,92$; $\gamma_e = 1,79$), и демонстрирует промежуточные показатели по сорбции и степени набухания.

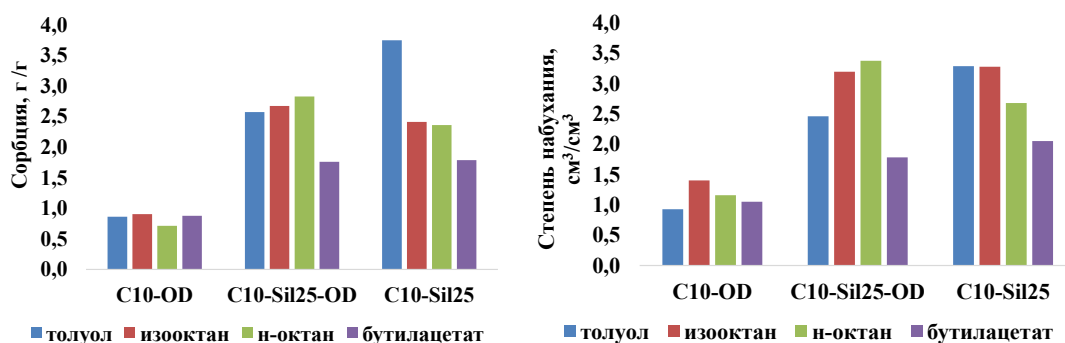


Рисунок 2 - Сорбция и степень набухания шитых C10 в индивидуальных растворителях (толуол, н-октан, изооктан и бутилацетат)

Сравнение газотранспортных свойств сшитых C10 показывает увеличение проницаемости по всем органическим компонентам в ряду C10-Sil25-OD > C10-Sil25 > C10-OD. На примере н-октана, проницаемость соответственно уменьшается следующим образом: 149690 > 94500 > 67140 Баррер. Рассчитанная идеальная селективность проницаемости компонентов по азоту представлена на рисунке 3.

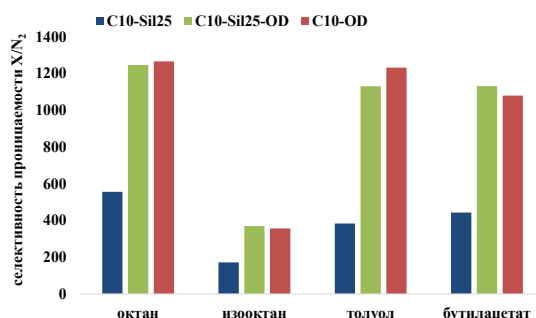


Рисунок 3 - Селективность ЛОС/ N_2 C10-OD, C10-Sil25, C10-Sil25-OD по парогазовой смеси ЛОС

Селективность сшитых C10 повышается в ряду C10-OD > C10-Sil25-OD > C10-Sil25. Наименьшая селективность характерна для образца C10, сшитого ПДМС, что обусловлено высокой подвижностью силоксановой цепи и низкой плотностью сшивки мембранного материала, что в свою очередь приводит к высокой проницаемости мембраны по N_2 . Образец C10-ОД, напротив, из-за своей жесткой сшитой структуры обладает наибольшей селективностью, при этом уступая в проницаемости C10-Sil-25. Наиболее интересные результаты показывает C10-Sil25-OD. Он обладает сопоставимой с C10-OD селективностью разделения ($\alpha(C_8H_{18}) = 1247$ и 1267 соответственно), но при этом обладает вдвое большей проницаемостью по компонентам смеси.

Полученные результаты показывают четкую разницу разделительных свойств сшитого C10 в зависимости от выбранного типа сшивающего агента. Наименьшее набухание и наибольшую плотность сшивания продемонстрировал C10-OD, противоположные результаты показал C10-Sil25, а C10-Sil25-OD обладает промежуточными значениями. При смеси C10-OD показывает наилучшую селективность по компонентам ЛОС в смеси с азотом, но данная мембрана низкопроницаема. C10-Sil25, напротив, показывает наилучшие значения проницаемости, но демонстрирует низкую селективность. Наиболее перспективным для выделения органических растворителей представляется мембрана C10-Sil25-OD, поскольку при сопоставимой с C10-OD величине селективности обладает вдвое большей проницаемостью.

Заключение

Полученные результаты показывают четкую разницу разделительных свойств сшитого C10 в зависимости от выбранного типа сшивающего агента. Наименьшее набухание и наибольшую плотность сшивания продемонстрировал C10-OD, противоположные результаты показал C10-Sil25, а C10-Sil25-OD обладает промежуточными значениями. При смеси C10-OD показывает наилучшую селективность по компонентам ЛОС в смеси с азотом, но данная мембрана низкопроницаема. C10-Sil25, напротив, показывает наилучшие значения проницаемости, но демонстрирует низкую селективность. Наиболее перспективным для выделения органических растворителей представляется мембрана C10-Sil25-OD, поскольку при сопоставимой с C10-OD величине селективности обладает вдвое большей проницаемостью.

Выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект № 23-79-10265).

Список литературы

1. I.L.Borisov, E.A.Grushevenko, T.S.Anokhina, D.S.Bakhtin, I.S.Levin, G.N.Bondarenko, V.V.Volkov, A.V.Volkov. Influence of side chains assembly on the structure and transport properties of comb-like polysiloxanes in hydrocarbon separation // *Materials Today Chemistry*. 2021. T. 22. Ст. 100598. DOI: 10.1016/j.mtchem.2021.100598.
2. И.Л.Борисов, Е.А.Грушевенко, А.В.Волков, В.В.Волков. Способ получения композиционной мембраны и композиционная мембрана, полученная этим способом. Патент РФ №2652228 от 25.04.2018 г. Бюл. №12.
3. Yushkin A., Grekhov A., Matson S., Bermeshev M., Khotimsky V., Finkelstein E., Budd P. M., Volkov V., Vlught T. J. H., Volkov A. Study of Glassy Polymers Fractional Accessible Volume (FAV) by Extended Method of Hydrostatic Weighing: Effect of Porous Structure on Liquid Transport // *React. Funct. Polym.* 2015. Vol. 86. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2014.06.010.
4. Flory P. J. Statistical Mechanics of Swelling of Network Structures // *J. Chem. Phys.* 1950. Vol. 18. DOI: 10.1063/1.1747424.

УДК 66.081.6

Фазлыев А.Р., Латыпов Д.Р., Клинов А.В.

Разделительные характеристики одно- и двухслойных полимерных первапорационных мембран

Фазлыев Азат Равилевич – к.т.н., доцент кафедры; fazlyevar@corp.knrtu.ru.

Латыпов Дамир Рашитович – к.т.н., ассистент кафедры;

Клинов Александр Вячеславович – д.т.н., профессор кафедры;

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»,
Россия, Республика Татарстан, Казань, 420015, ул. К. Маркса, 68.

В тезисах рассмотрены результаты экспериментальных исследований по первапорационному разделению смеси изопропанол-вода с исходной концентрацией 85 масс. % изопропанола. В рамках исследования были изучены разделительные характеристики однослойных и двухслойных полимерных первапорационных мембран. Рассматривались 3 вида однослойных мембран и 1 вид двухслойных мембран. Однослойные мембраны изготавливались на основе поливинилового спирта, модифицированного малеиновым ангидридом (ПВС-МА), полиуретановых иономеров на основе фосфорорганических полиолов и полиуретановых иономеров на основе бороорганических полиолов. Двухслойные мембраны, состояли из слоя поливинилового спирта, модифицированного малеиновым ангидридом и полиуретановым иономером на основе фосфорорганических полиолов. Эксперименты по обезвоживанию проводились на лабораторной первапорационной установке при температурах 40 °С и 60 °С и абсолютном давлении на стороне пермеата 20 мм рт. ст.

Ключевые слова: первапорация, полимерные мембраны, полиуретаны, поливиниловый спирт, водно-спиртовые смеси.

Separation characteristics of single- and double-layer polymer pervaporation membranes

Fazlyev A.R., Latypov D.R., Klinov A.V.

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation

The theses present the results of experimental studies on pervaporation separation of an isopropanol-water mixture with an initial concentration of 85 wt. % isopropanol. The study examined the separation characteristics of single-layer and double-layer polymer pervaporation membranes. Three types of single-layer membranes and one type of double-layer membranes were considered. Single-layer membranes were made on the basis of polyvinyl alcohol modified with maleic anhydride, polyurethane ionomers based on organophosphorus polyols and polyurethane ionomers based on organoboron polyols. Double-layer membranes consisted of a layer of polyvinyl alcohol modified with maleic anhydride and polyurethane ionomers based on organophosphorus polyols. Dehydration experiments were carried out on a laboratory pervaporation unit at temperatures of 40 °C and 60 °C and an absolute pressure on the permeate side of 20 mm Hg.

Key words: pervaporation, polymer membranes, polyurethanes, polyvinyl alcohol, water-alcohol mixtures.

Введение

Разделение азеотропных смесей, таких как водно-спиртовые системы, является одной из важнейших задач в химической промышленности. Традиционные методы, такие как экстрактивная и азеотропная ректификация, требуют значительных энергозатрат, использования дополнительных химических агентов и сложного аппаратного оформления. В связи с этим актуальной задачей является поиск альтернативных, более энергоэффективных и экологически безопасных методов разделения.

Первапорация — мембранный процесс, основанный на селективном проникновении одного из компонентов смеси через полупроницаемую мембрану [1]. Этот метод позволяет разделять азеотропные и близкиокпящие смеси без использования дополнительных реагентов, что делает его перспективным для промышленного применения.

Экспериментальная часть

Полимерные мембраны с селективным слоем из полиуретановых иономеров на основе фосфорорганических полиолов (АЭФК-ПУ) и полиуретановых иономеров на основе бороорганических полиолов (АЭБК-ПУ) [2, 3] были изготовлены методом формования из раствора. В качестве подложки использовались ультрафильтрационные мембраны на основе полимеров «Сульфон–4Т» и полипропилена (ЗАО НТЦ «Владипор», Россия). Селективный слой в виде раствора распределялся по подложке с помощью ручного аппликатора КАУ-1 (ООО «Константа», Россия),

использование которого позволяет контролировать толщину наносимого слоя. Следующим этапом является отверждение полимера при комнатной температуре в течение 24 часов.

Разделительные характеристики полимерных первапорационных мембран изучались на экспериментальной первапорационной установке [4], её схема представлена на (рис. 1). В качестве исходного сырья использовалась смесь изопропанол-вода с исходным содержанием 85 масс. % изопропанола. Эксперименты проводились при температурах 40 и 60 °С и абсолютном давлении на стороне пермеата 20 мм рт. ст.

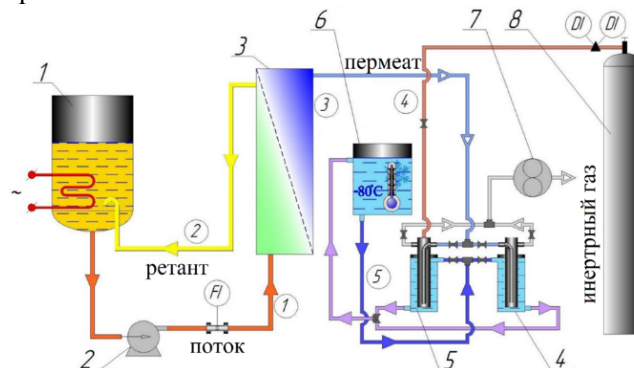


Рисунок 1 - Схема экспериментальной первапорационной установки: 1 – сырьевая емкость с обогревом; 2 – циркуляционный насос; 3 – мембранный модуль; 4, 5 – проточные холодные ловушки; 6 – криостат; 7 – вакуумный насос; 8 – баллон с инертным газом.

В ходе экспериментальных исследований также определялась сорбционная способность исследуемых полимеров в чистых компонентах, заключающаяся в возможности материала впитывать и удерживать в порах компоненты жидкой смеси при контакте с исходной смесью. В зависимости от состава используемого полимера, может разниться состав поглощённых компонентов, благодаря избирательной сорбции полимера к одному или нескольким (если смесь многокомпонентная) компонентам исходной смеси. Показатель определяет максимальное количество жидкой смеси, поглощённое сухим материалом после наступления насыщения. Зачастую набухание полимера ухудшает его механические свойства и в определенной степени оказывает влияние на разделительную способность.

Состав полимера при изготовлении пленок, не отличался от состава полимера при изготовлении селективного слоя первапорационных мембран. В качестве подложки для отлива пленок использовались чашки Петри. Формирование пленок проводилось путем испарения растворителя при комнатной температуре $\approx 22 \pm 1$ °С в течении 24 ± 1 ч.

Эксперименты по сорбционной способности проводили на чистых компонентах (вода, изопропиловый и этиловый спирты), а также водно-спиртовых смесях (изопропанол-вода, этанол-вода) в широком концентрационном диапазоне от 0 до 99 % масс.

Подготовленные образцы полимерных пленок помещались в бюксы с различными модельными смесями, фиксировалось время начала эксперимента. В ходе эксперимента производили измерение образцов полимерной пленки (измеряли линейные размеры, оценивали состояние поверхности, замеряли среднюю толщину) с определенной периодичностью, до наступления насыщения полимерной пленки. Эксперименты проводились при комнатной температуре 22 ± 1 °С.

Результаты экспериментальных исследований по разделению смеси изопропанол-вода представлены в (Таблица 1).

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований по первапорации

Мембрана	Температура процесса, °С	Поток пермеата, кг/м ² ·ч	Коэффициент разделения
АЭФК-ПУ	40	2,04	56
	60	3,73	54
АЭБК-ПУ	40	0,05	190
	60	0,15	44

Экспериментальные исследования по первапорационному разделению смеси изопропанол-вода мембранами АЭФК-ПУ и АЭБК-ПУ показали, что при увеличении температуры процесса на 20 °С

увеличивается поток пермеата, утверждение справедливо для обеих типов мембран. Однако при увеличении температуры снижается коэффициент разделения, что также справедливо для обеих типов мембран. Наилучшие разделительные характеристики показали мембраны АЭФК-ПУ, при температуре проведения процесса равной 60 °С, при данной температуре значения потока пермеата через мембрану увеличивается ~2 раза в сравнении с температурой проведения процесса равной 40 °С, при этом коэффициент разделения снижается незначительно. Мембраны АЭБК-ПУ показали высокие значения коэффициента разделения, но низкие показатели потока пермеата через мембрану снижают интерес по отношению к данным мембранам.

Результаты экспериментальных исследований по определению сорбционной способности полимерных пленок АЭФК-ПУ и АЭБК-ПУ в чистых компонентах представлены в (Таблица 2).

Из (Таблица 2) видно, что при проведении сорбции полимерных пленок в воде видна тенденция снижения сорбционной способности при увеличении температуры, вне зависимости от состава полимера. В изопропиловом спирте в зависимости от температуры сорбционная способность практически не изменяется и составляет ~ 11 %. В этиловом спирте с повышением температуры сорбционная способность полимерных пленок возрастает вне зависимости от состава пленки, при 22 °С равновесная степень набухания равна ~ 10 %, а при 60 °С равновесная степень набухания равна ~ 14 %.

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований по сорбционной способности

Растворитель	Температура процесса, °С	Равновесная степень набухания, %	
		Пленка АЭБК-ПУ	Пленка АЭФК-ПУ
Изопропанол	22	11,47	10,24
	40	11,73	10,24
	60	10,28	10,47
Этанол	22	10,44	9,92
	40	12,80	12,48
	60	13,90	13,94
Вода	22	9,12	9,13
	40	6,10	6,69
	60	4,26	4,65

Практический интерес для сравнения разделительных характеристик изготовленных мембран представляет сравнением с мембранами изготовленных из поливинилового спирта (ПВС), так как он является одним из первых коммерческих материалов пермеационных мембран и считается эталонным гидрофильным полимером для обезвоживания водно-органических смесей [29]. В связи с этим были изготовлены пермеационные мембраны из ПВС, отвержденные малеиновым ангидридом (ПВС-МА), а также двухслойные мембраны со слоем на основе ПВС-МА и АЭФК-ПУ для сравнения с разделительными характеристиками мембран АЭФК-ПУ и АЭБК-ПУ, изготовленных ранее. Полимерные двухслойные мембраны, состоящие из слоя ПВС-МА и АЭФК-ПУ, также изготавливались методом формования из раствора и наносились поочередно после полного отверждения полимера первого слоя.

В результате экспериментальных исследований по пермеационному разделению смеси изопропанол-вода при 40 °С получены данные по потоку пермеата и коэффициенту разделения через однослойную мембрану ПВС-МА. Поток пермеата составил ~ 2,5 кг/м²·ч, а коэффициент разделения не превышал ~100. При температуре процесса 60 °С поток пермеата увеличился в ~2,8 раза, однако коэффициент разделения снижался на 20%. Двухслойные мембраны из ПВС-МА и АЭФК-ПУ при температуре процесса 40 °С показали значения коэффициента разделения на порядок выше, чем у мембран АЭФК-ПУ, однако поток пермеата был в 4 раза ниже. Увеличение температуры проведения процесса на 20 °С увеличило поток пермеата через мембрану в 4 раза, при снижении коэффициент разделения всего в 2 раза.

Заключение

Согласно результатам, приведенным в данной работе, мембраны на основе АЭФК-ПУ являются наиболее сбалансированными с точки зрения соотношения разделительных характеристик по сравнению с мембранами на основе АЭБК-ПУ, вне зависимости от температуры проведения процесса. Практический интерес для дальнейшего изучения представляют собой двухслойные

мембраны, так как они показали перспективные результаты по разделительным характеристикам водно-спиртовой смеси на основе изопропанола, которые требуют дополнительного подтверждения в последующих исследованиях.

Список литературы

1. Волков В. Разделение жидкостей испарением через полимерные мембраны // Известия Академии наук. 1994. Т. 2. Стр. 208.
2. Davletbaeva I.M. et al. Organophosphorus Polyurethane Ionomers as Water Vapor Permeable and Pervaporation Membranes // Polymers. 2021. Vol. 13, № 9. P. 1442.
3. Davletbaeva I.M. et al. Pervaporation Polyurethane Membranes Based on Hyperbranched Organoboron Polyols // Membranes. 2022. Vol. 12, № 12. P. 1247.
4. Латыпов Д. и др. Гидродинамика лабораторного мембранного модуля // Вестник технологического университета. 2023. Т. 26, № 8. Стр. 31–35.

УДК 678.023

Федарович Е.Г., Левданский А.Э., Нурмухамедов Х.С., Султанов Ж.В.

Механическая переработка отходов производства термореактивных стеклопластиков

Федарович Евгений Геннадьевич, аспирант; e-mail: zhenya.fedorovich.1999@mail.ru

Левданский Александр Эдуардович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой процессов и аппаратов химических производств

Белорусский государственный технологический университет, Республика Беларусь, 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а

Нурмухамедов Хабибулла Сагдуллаевич, д.т.н., профессор кафедры технологические машины и оборудования

Султанов Жавохир Валиджанович, старший преподаватель кафедры технологические машины и оборудования

Ташкентский химико-технологический институт, Республика Узбекистан, 100011, г. Ташкент, ул. Навои 32

Рассмотрена проблема массового образования отходов стеклопластиковых изделий. Представлены возможные методы утилизации образующихся отходов. Сделан вывод о пригодности механического метода переработки стеклопластиковых отходов как наиболее экологически целесообразного. Представлена разработанная ударно-центробежная мельница для измельчения отходов производства стеклопластиков на основе термореактивного связующего. Дана краткая характеристика образующимся продуктам измельчения отходов стеклопластика в ударно-центробежной мельнице. Сформулирован вывод о пригодности использования разработанной мельницы для измельчения термореактивного стеклопластика.

Ключевые слова: отходы стеклопластика, термореактивная матрица, вторичное волокно, ударно-центробежная мельница.

Mechanical recycling of waste from the production of thermosetting plastic based on glass fiber

Fedarovich E.G., Levdanski A.E.

Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

Nurmuhamedov H.S., Sultanov Zh.V.

Tashkent Institute of Chemical Technology, Tashkent, Republic of Uzbekistan

The problem of mass formation of waste products of fiberglass-reinforced plastics is considered. Possible methods of recycling the generated waste are presented. A conclusion is made about the suitability of the mechanical method of processing fiberglass-reinforced plastic waste as the most environmentally friendly. The developed impact-centrifugal mill for grinding waste of fiberglass-reinforced plastics based on a thermosetting binder is presented. A brief description of the resulting products of grinding fiberglass-reinforced plastic waste in an impact-centrifugal mill is given. A conclusion is formulated about the suitability of using the developed mill for grinding thermosetting fiberglass-reinforced plastic.

Key words: fiberglass-reinforced plastic waste, thermosetting matrix, secondary fiber, impact-centrifugal mill.

В последние годы, полимерные композиционные материалы (ПКМ) находят широкое применение практически во всех отраслях промышленности – в аэрокосмической, строительной, автомобильной, радиоэлектронике и др.

Стеклопластики представляют собой композиционные материалы, армированные стекловолокном с использованием в качестве матрицы термореактивного связующего. Благодаря своим высоким физико-механическим и химическим свойствам, таким как высокая прочность при относительно небольшой плотности, стойкость к химическому и биологическому воздействию, теплостойкость и низкая теплопроводность, они получили наибольшее распространение среди ПКМ в мире [1, 2].

Широкое распространение и объемное производство стеклопластиковых изделий приводит к массовому образованию отходов. Отходы образуются в процессе производства стеклопластиковых изделий в виде обрезков, незаконченных изделий, а также в случае брака или поломки готовых изделий, которые в большинстве случаев не подлежат ремонту и не используются вторично. Кроме того, значительное количество отходов образуется после окончания срока службы уже эксплуатируемых изделий [3, 4].

Образующиеся отходы, в основном, утилизируются методом захоронения на специальных полигонах. Несмотря на относительную дешевизну процесса, большинство государств принимает законы запрещающие или ограничивающие объемы утилизируемых отходов данным способом. Например, по отношению к автомобильной промышленности законодательство Европейского союза (ЕС) требует, чтобы 85 % транспортного средства подлежало вторичной переработке. В Нидерландах, Германии, Австрии и Финляндии захоронение композитных отходов и сжигание запрещено «в принципе». В Германии введен запрет на захоронение отходов ПКМ с содержанием органической составляющей (связующего) более 5 %. В Нидерландах, согласно 3-му изданию Национального плана по управлению отходами, запрещается захоронение отходов ПКМ за исключением случаев, если стоимость вторичной переработки составляет свыше 200 евро/т. Франция рассматривает возможность введения целевого показателя переработки для ветряных турбин на основе стеклопластика в свою нормативную базу [5, 6].

В настоящее время известно три основных метода утилизации ПКМ: физический, химический и термический. Наиболее распространенным и исследуемым термическим методом утилизации отходов стеклопластиков является метод пиролиза, сущность которого заключается в термической обработке материала при отсутствии воздуха. Основная цель процесса заключается в отделении волокон от матрицы, что достигается процессами пиролиза при разных температурах, в псевдоожиженном слое или микроволновом пиролизе. Несмотря на получение вторичных волокон практически без потери прочности от первоначальной, данный способ не находит промышленного применения ввиду серьезных недостатков: выделение большого числа токсичных продуктов, очистка и нейтрализация которых является отдельной важной задачей и образование углерода на поверхности волокон, для удаления которого необходимо осуществлять дополнительную постпиролизную обработку путем окисления, проводимого при определенных параметрах температуры и времени выдержки. Химические методы утилизации отходов ПКМ представляют собой процесс, в котором полимеры химически преобразуются в мономеры или частично деполимеризуются в олигомеры посредством химической реакции. Полимерная матрица, присутствующая в композите разрушается путем растворения ее в любом химическом растворе включая, например, кислоты, основания и растворители. Однако, как и в случае с термическими методами, химические методы оказывают существенное негативное влияние на окружающую среду ввиду использования в технологии переработки токсичных и концентрированных химикатов.

Наиболее перспективным методом утилизации волокнистых композитов, в частности стеклопластиков на термореактивном связующем, является их механическая переработка посредством измельчения. В сравнении с ранее перечисленными химическими и термическими методами, данный метод не оказывает вреда окружающей среде, подходит для большинства видов отходов ПКМ на основе термореактивной матрицы, имеет возможность перерабатывать большие объемы отходов и прост в технологическом оформлении. К недостаткам данного метода следует отнести высокую энергоемкость процессов измельчения, дробления и резания в совокупности с сложностью регулирования размеров измельчаемых пластиков, ухудшение механических свойств измельченных армирующих волокон и ограниченное вторичное применение переработанных материалов.

Проведенный нами обзор исследований в области изучения механизмов разрушения термореактивных стеклопластиков показал, что наиболее эффективным методом измельчения термореактивных стеклопластиков является его динамическое разрушение под действием ударных нагрузок [7–10]. Разрушение материалов ударными нагрузками довольно эффективно реализуется в центробежных мельницах. В этих агрегатах процесс измельчения практически полностью переносится с вращающегося рабочего органа на периферийную отражательную поверхность. Рабочий орган мельницы – ротор, выполняет разгонную функцию для придания материалу высокой скорости.

В результате, для измельчения отходов стеклопластика на основе термореактивного связующего, на кафедре процессов и аппаратов химических производств Белорусского государственного технологического университета разработана ударно-центробежная мельница, общий вид которой представлен на рисунке 1.

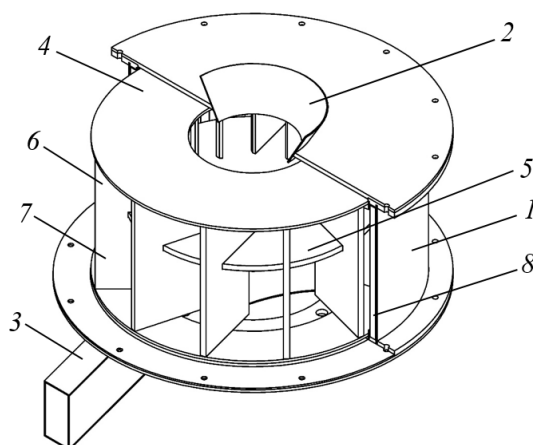


Рисунок 1 – Общий вид ударно-центробежной мельницы:

1 – корпус; 2 – загрузочный патрубок; 3 – разгрузочный патрубок; 4 – ротор; 5 – диск ротора; 6 – разгонные лопатки; 7 – отбойные лопатки; 8 – отбойная поверхность

Мельница состоит из цилиндрического корпуса 1, загрузочного 2 и разгрузочного 3 патрубков, ротора 4 состоящего из диска 5 с расположенными на нем разгонными 6 и отбойными 7 лопатками, и отбойной поверхности 8 в виде отражательных стержней.

Измельчению подвергали отходы производства стеклопластиковых изделий образующиеся на предприятии ООО «Полоцк-Стекловолокно»: куски стеклоармированных стержней (диаметром 3,5–5 мм) на основе эпоксидной смолы ЭД-20 в количестве 20–23 % и обрезки стеклохолста (толщиной 2–3 мм) на основе полиэфирной смолы Депол С-180 ПТ, 60–63 %.

Исходные куски отходов стеклопластика первоначально подвергались ручной резке до размеров, определяющимся межлопаточным расстоянием разгонных лопаток ротора ударно-центробежной мельницы (35×35 мм). Далее, отходы стеклопластика с постоянным массовым расходом 100 кг/ч подавались в загрузочный патрубок мельницы. В результате воздействия на материал ударных нагрузок, оказываемых при многократном контакте с отбойной поверхностью мельницы и отбойными лопатками, происходит измельчение более хрупкой полимерной матрицы с высвобождением стекловолокна. Полученный продукт измельчения отходов стеклопластика представлял собой систему, состоящую из кусков недоизмельченного стеклопластика, пучков стекловолокна скрепленных матрицей, отдельных волокон и частиц измельченной полимерной матрицы.

Используя гравитационный пневмокласификатор и задавая в нем различную скорость воздушного потока, из продуктов измельчения отходов стеклоармированных стержней выделено 30 % волокна (рисунок 2) и 50 % соответственно из продуктов измельчения обрезков стеклохолста. Полученный материал представлял собой совокупность волокон длиной от 4 до 25 мм. Общее содержание полимерной смолы, определяемой по методу выжигания в муфельной печи при температуре 600 °С составляет соответственно 36,35 и 46,1 % для волокнистого материала выделенного из продуктов измельчения стеклоармированных стержней и обрезков стеклохолста.



Рисунок 2 – Волокнистый материал, полученный из стеклоармированных стержней

В результате проведения экспериментальных исследований, установлено, что использование разработанной ударно-центробежной мельницы позволяет осуществлять механическую переработку отходов производства термореактивных стеклопластиков с получением вторичного стекловолокна. Выделяемое из продуктов измельчения волокно может быть использовано как исходный компонент в различных отраслях промышленности: при производстве новых ПКМ, в цементной и асфальтной промышленности и т.д., что в свою очередь приводит к уменьшения негативного воздействия отходов на окружающую среду, а также способствует уменьшению себестоимости продукции и решению задач утилизации отходов стеклопластика.

Список литературы

1. Talalaeva G.V., Paznikova S.N. Modern composite materials: prospects and risks of their use in the field of integrated security and civil defense // *Civil SecurityTechnology*. 2023. № 75 (1). P. 107–114.
2. Rafiee R., Ghorbanhosseini A. Developing a micro-macromechanical approach for evaluating long-term creep in composite cylinders. *Thin-Walled Struct.* 2020. № 151. P. 106714.
3. Broekel J., Scharr G. The specialities of fibre-reinforced plastics in terms of product lifecycle management. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. № 162. P. 725–729.
4. Conroy A., Halliwell S., Reynolds T. Composite recycling in the construction industry. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2006. № 37 (8). 2006. P. 1216–1222.
5. Amaechi C.V., Agbomerie C.O., Orok E.O., Ye J. Economic Aspects of Fiber Reinforced Polymer Composite Recycling. In *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*. 2020. P. 377–397.
6. Krauklis A.E., Karl C.W., Gagani A.I., Jørgensen J.K. Composite Material Recycling Technology—State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s. *J. Compos. Sci.* 2021. № 5 (28). P. 33.
7. Shaktivesh, Nair N.S., Sesha Kumar Ch.V., Naik N.K. Ballistic impact performance of composite targets. *Materials and Design*. 2013. № 51. P. 833–846.
8. Hossain M.E., Hossain M.K., Hosur M., Jeelani S. Low-velocity impact behavior of CNF-filled glass-reinforced polyester composites. *Journal of Composite Materials*. 2014. № 48(7). P. 879-896.
9. Балакирев А.А., Гладкий И.Л., Мехоношин Г.В., Куракин А.Д., Нихамкин М.Ш., Саженов Н.А., Семенов С.В., Соломонов Д.Г. Экспериментальное исследование закономерностей усталостного разрушения толстых стержней из слоистого углепластика. *Вестник Пермского нац. исслед. политех. ун-та*. 2023. № 72. С. 111–124.
10. Иванов А.Г., Сырунин А.М., Лучинин В.И. Ударно-волновое разрушение намоточного стеклопластика в различных направлениях. *Прикладная механика и техническая физика*. 1991. № 4. С. 157–161.

УДК 66.074.5.022.62

Черепанов А.П., Климкин М.А., Ломакин С.П.

Мембранные методы осушки газов

Черепанов Антон Палович – студент; cherepanov_toni@bk.ru;

Климкин Максим Александрович – к.х.н., доцент кафедры;

Ломакин Сергей Петрович – к.т.н., доцент кафедры;

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,

Россия, ПФО, Республика Башкортостан, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1,

В работе рассматриваются принципы мембранного разделения для осушки газовых смесей с акцентом на применение для азота. Описывается основной механизм селективного пропускания компонентов через полупроницаемую мембрану, анализируются преимущества данного подхода с точки зрения энергоэффективности, компактности оборудования и возможности непрерывного процесса. Представленный метод позволяет существенно снизить содержание влаги в газе, что является важным условием для обеспечения качества конечного продукта в различных отраслях промышленности.

Ключевые слова: мембранное разделение, осушка газов, азот, селективная проницаемость, энергоэффективность, полимерные мембраны, полиимиды, многоступенчатая очистка, инертнизация.

Membrane methods for gas drying

Cherepanov A.P., Klimkin M.A., Lomakin S.P.

Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation

In this paper, the principles of membrane separation for gas drying are examined, with an emphasis on its application for nitrogen. The primary mechanism of selective permeation of components through a semi-permeable membrane is described, and the advantages of this approach are analyzed in terms of energy efficiency, equipment compactness, and the potential for continuous operation. The proposed method significantly reduces the moisture content in the gas, which is a crucial condition for ensuring the quality of the final product in various industrial sectors.

Keywords: membrane separation, gas drying, nitrogen, selective permeability, energy efficiency, polymer membranes, polyimides, multi-stage purification, inertia.

Введение

В условиях растущих требований к качеству газовых продуктов и снижения энергозатрат традиционные методы осушения, такие как адсорбция и криогенное охлаждение, часто оказываются недостаточно эффективными. Эти методы, несмотря на широкое применение, связаны с высокими эксплуатационными расходами, сложностью обслуживания и экологическими рисками, связанными с использованием химических реагентов. В этой связи мембранные технологии представляют собой перспективное направление, позволяющее обеспечить высокую степень очистки газов за счет использования селективных барьерных материалов. Применение мембранных методов для осушения, в том числе азота, становится особенно актуальным в процессах, где требуется поддерживать минимальное содержание влаги (ниже 0,1%) без использования химических реагентов, что критически важно для таких отраслей, как: отдельные процессы химической технологии (процессы полимеризации), фармацевтика, электроника и авиационная промышленность.

Основная часть

Основной принцип мембранного метода заключается в разнице диффузионных и растворяющих свойств компонентов газовой смеси. Полупроницаемая мембрана, обладающая селективной проницаемостью, способствует ускоренному прохождению молекул водяного пара по сравнению с основным газом. Это достигается за счёт различий в размере молекул, их растворимости в материале мембраны и специфических взаимодействиях с полимерной или керамической структурой. Такой подход обеспечивает разделение компонентов без химических реакций и с минимальными энергетическими затратами. (рис. 1).

Мембраны для осушки газов изготавливаются из полимерных материалов, таких как полиимиды, полиэфирсульфоны или целлюлозные ацетаты. Эти материалы обладают высокой селективностью по отношению к воде и устойчивостью к агрессивным средам. [1-2]. Мембранные технологии обладают рядом преимуществ перед традиционными методами осушки:

1. **Энергоэффективность:** процесс требует на 40% меньше энергии по сравнению с адсорбционными системами, так как исключает этапы нагрева/охлаждения. Например,

энергопотребление мембранных установок для получения азота составляет 0,12–0,22 кВт·ч/м³, тогда как криогенные методы расходуют до 0,35 кВт·ч/м³.

2. **Компактность:** модульная конструкция позволяет интегрировать системы в ограниченное пространство, что особенно актуально для морских платформ и мобильных установок.

3. **Экологичность:** отсутствие химических реагентов снижает риск загрязнения и упрощает сертификацию оборудования по стандартам ISO 14001.

4. **Адаптивность:** технология может масштабироваться под конкретные задачи — от лабораторных установок до промышленных комплексов производительностью более 1000 м³/ч [3].

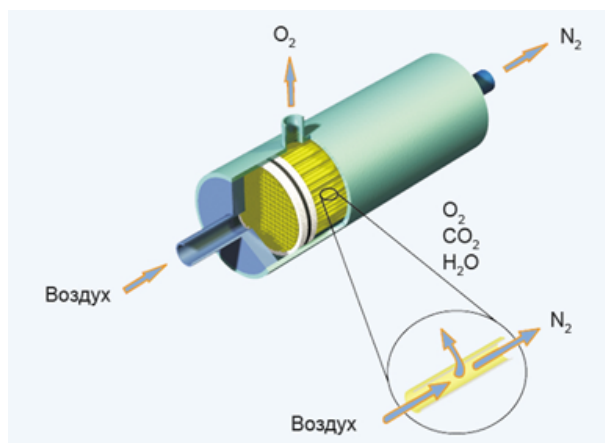


Рисунок 1 - Газоразделительный картридж

Мембранные технологии приобретают ключевое значение в процессах доочистки азота, особенно в промышленных системах инертизации, где требования к чистоте газа достигают 99,5–99,9%. [4]. Применение мембранных систем для инертизации азота в процессах полимеризации играет критическую роль в обеспечении безопасности, стабильности и эффективности технологических процессов. В полимеризации, где даже минимальное присутствие кислорода или влаги может привести к нежелательным побочным реакциям, отравлению катализаторов, дефектам продукции или даже взрывам, использование высокоочищенного азота является обязательным условием. Мембранные технологии позволяют достичь уровня чистоты азота до 99,9%, с содержанием кислорода менее 0,1% и точкой росы до -70°C , что полностью удовлетворяет строгим требованиям процессов полимеризации. Эффективность таких систем зависит от селективности мембранных материалов, оптимизации рабочих параметров и предварительной подготовки газового потока.

Основой мембранной технологии является выбор полимеров с высокой проницаемостью для целевых примесей (O_2 , H_2O , CO_2). Наибольшую селективность демонстрируют полиимиды (ПИ) и полисульфоны. Например, полиимидные мембраны обеспечивают селективность $\alpha(\text{O}_2/\text{N}_2)$ до 6,9, снижая содержание кислорода в азоте до 0,5%. [5]. Однако их устойчивость к агрессивным средам требует экспериментальной проверки. В ходе исследований целесообразно сравнивать материалы, такие как целлюлозный ацетат (низкая стоимость) и полифениленоксид (ППО), который сохраняет стабильность при температурах до $+70^{\circ}\text{C}$. [6].

Таблица 1

Сравнение свойств мембранных материалов

Материал	Селективность $\alpha(\text{O}_2/\text{N}_2)$	Макс. температура, $^{\circ}\text{C}$	Устойчивость к влаге	Стоимость
Полиимид (ПИ)	6.9	70	Высокая	Высокая
Полисульфон	5.2	60	Средняя	Средняя
Целлюлозный ацетат	3.8	50	Низкая	Низкая

Давление и температура напрямую влияют на производительность и чистоту продукта. При повышении давления до 2,5 МПа скорость диффузии «быстрых» газов (O_2 , H_2O) увеличивается, но избыточное давление снижает селективность мембраны на 10–15%. [5]. Эксперименты с

варьированием давления (1.0–2.5 МПа) позволяют определить оптимальный баланс. Температурный режим также критичен: подогрев до +40°C предотвращает конденсацию влаги, однако ускоряет деградацию полимеров. [6]. Для тестирования рекомендуется использовать циклы нагрева (+40...+55°C) с фиксацией изменений селективности.

Загрязнение мембран масляными парами или частицами пыли снижает их эффективность на 30–40%. Для решения этой проблемы применяется многоступенчатая очистка:

1. Удаление масляных аэрозолей угольными фильтрами;
2. Осушение до точки росы –70°C с помощью рефрижераторных осушителей;
3. Фильтрацию твердых частиц коалесцирующими фильтрами.

Эксперименты показывают, что остаточная влажность >0.1% уменьшает селективность мембран на 15–20%, что подтверждает необходимость строгого контроля точки росы.

Для достижения высокой чистоты азота (99.9%) применяют последовательное соединение 3–4 модулей. [4].

Таблица 2

Сравнение конфигураций модулей

Параметр	1 модуль	3 модуля	4 модуля
Чистота азота, %	98.5	99.7	99.9
Энергопотребление, кВт·ч/м³	0.12	0.18	0.22

Плотность упаковки волокон (>10 000 м²/м³) и их диаметр (оптимально 150–500 мкм) влияют на гидродинамическое сопротивление. Тонкие волокна увеличивают площадь контакта, но требуют поддержания давления на уровне 2.0–2.2 МПа [6]. В экспериментах важно оценить компромисс между компактностью системы (модульный принцип) и энергозатратами на компрессию.

Кроме того, мембранные установки при использовании в авиатопливной отрасли обеспечивают безопасность хранения керосина, снижая риск взрывов. Требуемые параметры: чистота азота ≥99.5%, точка росы –70°C. [4]. Экспериментальное моделирование процесса для резервуаров объемом 1000 м³ показало, что комбинация мембранной и адсорбционной доочистки позволяет достичь содержания O₂ ≤0.1%. [6]. При этом энергопотребление системы не превышает 0.15 кВт·ч/м³, что на 30% ниже, чем у криогенных методов. [5].

Экспериментальные исследования подтверждают, что мембранные технологии обеспечивают энергоэффективную доочистку азота для задач инертизации. Ключевыми направлениями для оптимизации являются: выбор селективных материалов (полиимиды), контроль давления (1.5–2.0 МПа) и обязательная многоступенчатая подготовка газа. Дальнейшие работы могут включать тестирование гибридных систем (мембраны + цеолиты) для достижения чистоты >99.95%. [6].

Заключение

В заключение, проведенное исследование подтверждает высокую эффективность мембранных методов осушки газов, в частности азота, благодаря сочетанию энергоэффективности, компактности оборудования и экологической безопасности за счёт отсутствия использования химических реагентов. Анализ показал, что ключевым фактором успешного применения является выбор селективных материалов: полиимиды обеспечивают оптимальное соотношение проницаемости и устойчивости, а оптимальные условия работы — давление 1.5–2.0 МПа и температурный режим +40...+55°C — позволяют добиться баланса между производительностью и сохранением селективности мембран. Кроме того, многоступенчатая очистка газа, включая удаление масел и твёрдых частиц, существенно повышает долговечность системы. Применение последовательного соединения мембранных модулей позволяет достигать чистоты азота до 99.9%, что удовлетворяет строгим требованиям различных отраслей промышленности, а интеграция с адсорбционными методами (например, с использованием цеолитов) открывает перспективы по дальнейшему снижению энергозатрат и повышению чистоты продукта.

Следует также отметить, что мембранные технологии могут быть адаптированы для использования в других отраслях, таких как пищевая промышленность, где требуется высокая степень очистки газов для упаковки продуктов, или в медицинской сфере для производства чистых газов, используемых в аппаратах искусственной вентиляции лёгких. Кроме того, дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку новых полимерных материалов с улучшенными свойствами, такими как повышенная устойчивость к высоким температурам и агрессивным средам, что позволит расширить область применения мембранных технологий.

Таким образом, мембранные технологии обеспечивают не только высокую чистоту азота, но и экономическую выгоду за счёт снижения эксплуатационных затрат. Их применение в процессах полимеризации, и не только, способствует повышению безопасности, стабильности и качества конечного продукта, что делает их незаменимым инструментом в современных химических производствах.

Список литературы

1. Мембранные установки подготовки природного и попутного нефтяного газа, комплексные решения НПК Грасис // Neftegaz.ru [Электронный ресурс]//Neftegaz: [сайт]. — URL: <https://neftegaz.ru> (дата обращения: 10.02.2025).
2. Атласкина, М. Е. Физико-химические основы технологии мембранно - абсорбционного газоразделения (маг) для удаления диоксида углерода из метансодержащих газовых смесей: специальность 2.6.15. «Мембраны и мембранная технология (технические науки)»: Диссертация на соискание кандидата технических наук // Атласкина, М. Е; Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева. — Москва, 2023. — 116 с.
3. Баландина, А. Г., Хангильдин, Р. И., Ибрагимов, И. Г., Мартяшева, В. А. Развитие мембранных технологий и возможность их применения для очистки сточных вод предприятий химии и нефтехимии [Текст] // А. Г. Баландина, Р. И. Хангильдин, И. Г. Ибрагимов, В. А. Мартяшева // Нефтегазовое дело. — 2015. — № 5. — С. 336-375.
4. Цыркунов Евгений Сергеевич Применение мембранных установок получения азота в сфере авиатопливообеспечения // Научный вестник МГТУ ГА. 2010. №160. URL: <https://cyberleninka.ru> (дата обращения: 20.02.2025).
5. Кузнецов Ю. Л., Бураков А. В., Перминов А. С., Серебренников С. Н. Мембранные технологии в установках получения азота из воздуха // Экспозиция Нефть Газ. 2017. №6 (59). URL: <https://cyberleninka.ru> (дата обращения: 11.02.2025).
6. Петров С.К. Оптимизация мембранного процесса // Петров С.К. [Электронный ресурс] // Infinit Gas: [сайт]. — URL: <https://www.infinit-gas.ru/membrantehnology> (дата обращения: 20.02.2025).

УДК 66.081.63

Шворобей Ю.В., Маркелов А.В., Небесская А.П., Юшкин А.А., Волков В.В., Волков А.В.

Применение промышленных и лабораторных фильтрационных мембран для очистки отработанных моторных масел

Шворобей Юлия Вадимовна – студент; shvorobeyjulia@gmail.com

Маркелов Александр Владимирович – д.т.н., с.н.с.;

Небесская Александра Павловна – аспирант, м.н.с.;

Юшкин Алексей Александрович – к.х.н., с.н.с.;

Волков Владимир Васильевич – д.х.н., профессор, г.н.с.;

Волков Алексей Владимирович - д.х.н., советник директора ИНХС РАН, г.н.с.

ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени «Институт нефтехимического синтеза имени А. В. Топчиева» Российской академии наук, Россия, Москва, 119991, Ленинский проспект, 29.

В работе исследована возможность очистки отработанного моторного масла (ОММ) с использованием двухступенчатой мембранной фильтрации. Для первой ступени использовали коммерческие трубчатые мембраны (МФФК/УФФК), а для второй – лабораторные ультрафильтрационные мембраны из полиакрилонитрила. Показано, что мембранная фильтрация эффективно удаляет загрязняющие компоненты, включая твердые частицы, продукты полимеризации, окисления и тяжелые металлы (задерживание – до 70%), улучшая физико-химические характеристики ОММ.

Ключевые слова: ультрафильтрация, микрофильтрация, очистка, отработанное моторное масло, полиакрилонитрил.

The application of industrial and laboratory filtration membranes for the purification of used engine oils

Shvorobey Yu.V., Markelov A.V., Nebesskaya A.P., Volkov V.V., Volkov A.V.

Federal State Budgetary Institution of Science "A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis" of the Russian Academy of Sciences, 29 Leninsky Prospect, Moscow, 119991, Russia.

This study investigates the possibility of purifying used engine oil (UEO) using a two-stage membrane filtration process. The first stage utilized commercial tubular membranes (MFFC/UFFC), while the second stage employed laboratory-made ultrafiltration membranes based on polyacrylonitrile. It was demonstrated that membrane filtration effectively removes contaminants, including solid particles, polymerization and oxidation products, and heavy metals (with a retention rate of up to 70%), thereby improving the physicochemical properties of UEO.

Key words: ultrafiltration, microfiltration, purification, used engine oil, polyacrylonitrile.

Введение

В настоящее время в мире образуется около 40-45 миллионов тонн в год отработанного моторного масла (ОММ), при этом 60% отходов не соответствуют экологическим стандартам. Неправильная утилизация приводит к загрязнению почвы, водоемов и воздуха. Это влечет за собой различные заболевания людей и животных, в то время как переработка отработанных масел в полезные продукты является лучшим вариантом решения задачи снижения количества отходов и экономии природных углеводородных ресурсов [1].

Существующие методы очистки отработанных моторных масел включают механические, химические и физические подходы. Однако каждый из них имеет свои ограничения, такие как недостаточная эффективность или высокая стоимость, что затрудняет их широкое использование. В качестве перспективной альтернативы дистилляции в последние годы исследуются мембранные технологии – микро- и ультрафильтрация – для разделения вязких жидких сред.

Баромембранные процессы позволяют в непрерывном режиме в относительно мягких условиях разделять вязкие жидкие системы при низких энергозатратах, хотя высокая вязкость масел ограничивает применение фильтрационных методов. Достоинствами мембранных процессов является простота их масштабирования и легкость интегрирования в существующие и вновь создаваемые процессы. Однако высокая вязкость нефти и нефтепродуктов является сдерживающим фактором для применения фильтрационных процессов для разделения таких сред [2].

Для снижения вязкости используют фильтрацию при повышенных температурах или разбавление растворителем [3]. Однако разбавление низкомолекулярным растворителем приводит к

необходимости его выделения после мембранной фильтрации, для чего обычно используют дистилляционные процессы. Керамические мембраны, в отличие от полимерных, можно эксплуатировать в относительно экстремальных условиях, например, при высоких температурах и давлении, так как они обладают термической и химической стабильностью. С другой стороны, существенно более дешевые полимерные мембраны, которые могут применяться в ограниченном температурном диапазоне [2]. В данной работе проводилось исследование возможности очистки отработанного моторного масла с использованием коммерческих и лабораторных микро- и ультрафильтрационных полимерных мембран в достаточно умеренных температурных условиях.

Экспериментальная часть

В работе исследована очистка отработанного моторного масла в процессе двухступенчатой фильтрации с использованием коммерческих трубчатых мембран УФФК и МФФК (ЗАО НТЦ «Владипор», Владимир, Россия) и лабораторных плоских мембран, сформованных из коммерческого полимера ПАН с молекулярной массой $M_w = 85,000$ г/моль (Haihang Industry Co., LTD, Китай). Смесь отработанных моторных масел (ОММ) взята с накопительных резервуаров зоны ТО легковых автомобилей фирмы ООО «Альфа Мотор Групп» г. Москва. Схема двухступенчатой фильтрации представлена на рис. 1. Фильтрационные эксперименты проводились на лабораторной установке проточного режима, состоящая из бака, насоса, трубчатого мембранного элемента и запорно-регулирующей аппаратуры. На первой ступени отработанное масло подвергалось очистке с помощью трубчатых мембран МФФК или УФФК, а на второй ступени полученный пермеат дополнительно фильтровали в режиме тупиковой фильтрации через ПАН-мембраны для увеличения степени очистки масла.

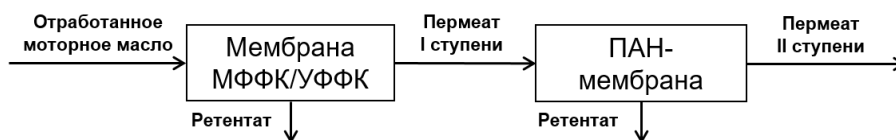


Рисунок 1 - Схема двухступенчатой фильтрации отработанного моторного масла.

Проницаемость мембран (P) рассчитывали по следующей формуле:

$$P = \frac{V}{\rho \cdot S \cdot \Delta t \cdot \Delta p}, \quad (1)$$

где m – объем пермеата (л), прошедшего через мембрану с площадью S (m^2) в течение времени Δt (ч) при трансмембранном давлении Δp (МПа).

В процессе фильтрации отработанного масла наблюдалось снижение проницаемости мембран с последующим выходом на стационарный режим течения, характеризующийся постоянной во времени проницаемостью, как показано на рис. 2. Проницаемость трубчатой мембраны МФФК после выхода на стационарный режим составила $2,0 \pm 0,1$ л/($m^2 \cdot ч \cdot МПа$). При этом проницаемость УФФК изменяется от $0,53 \pm 0,04$ до $1,2 \pm 0,2$ л/($m^2 \cdot ч \cdot МПа$) в зависимости от трансмембранного давления.

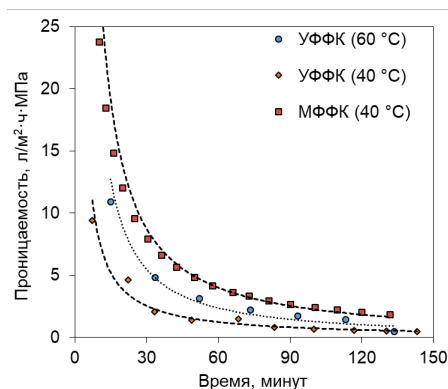


Рисунок 2 - График изменения проницаемости отработанного моторного масла при фильтрации на МФФК и УФФК при температуре 40 °С.

Результаты фильтрационных экспериментов с использованием мембраны МФФК при температуре 40 °С и давлении 0,1 и 0,2 МПа представлены в таблице 1. При этом исходную смесь ОММ, пермеат и ретентат характеризовали такими величинами, как цветность, плотность и динамическая вязкость. Для измерения вязкости проб фильтрации использовали ротационный вискозиметр Brookfield DV III-Ultra (Brookfield Engineering Labs, Миддлборо, Массачусетс, США). Показано, что при фильтрации ОММ происходит снижение цветности, плотности и динамической вязкости в пермеате, что говорит о задерживании различных твердых частиц и продуктов полимеризации, которые образуются при эксплуатации моторного масла.

Таблица 1

Элементный анализ отработанного масла, пермеата и ретентата фильтрации на МФФК
(условия: 40 °С, 0,2 МПа)

Образцы	Цветность	Плотность, г/см ³	Динамическая вязкость, мПа·с
ОММ	7,5	0,851±0,001	87,5±0,2
Пермеат (условия: 40 °С, 0,2 МПа)	7,0	0,847±0,001	67,3±0,2
Ретентат	7,5	0,852±0,001	88,9±1,3

Содержание С, Н, N, S и О в образцах определяли с помощью элементного анализатора TruSpec Micro CHNS с TruSpec Micro Oxygen Add-on (Leco, USA). В таблице 2 приведены результаты элементного анализа по углероду, водороду и кислороду, при этом содержание азота и серы были ниже предела обнаружения. Высокое содержание кислорода в отработанном масле говорит о том, что из-за старения в условиях эксплуатации происходит окисление моторного масла, что приводит к его деградации. В процессе фильтрации на мембране МФФК при температуре 40 °С и давлении 0,2 МПа происходит снижение содержания кислорода, что говорит о задерживании продуктов окисления. Содержание углерода и водорода изменяется в пределах погрешности.

Таблица 2

Элементный анализ отработанного масла, пермеата и ретентата фильтрации на МФФК
(условия: 40 °С, 0,2 МПа)

Образцы	С, %	Н, %	О, %
ОММ	84,0±1,9	13,8±0,3	5,0±0,2
Пермеат (условия: 40 °С, 0,2 МПа)	88,3±0,7	13,9±0,1	4,2±0,1
Ретентат	84,8±0,5	14,1±0,6	5,2±0,4

Анализ содержания металлов в ОММ, пермеате и ретентате исследовали методом атомно-эмиссионной спектроскопией с индукционно-связанной плазмой, ICPE-9000 фирмы SHIMADZU. В отработанном моторном масле были найдены такие металлы, как Al, Cu, Fe, Ca, Mg, Mo и Zn (рис. 3). Показано, что в процессе фильтрации на МФФК происходит задерживание металлов до 70%.

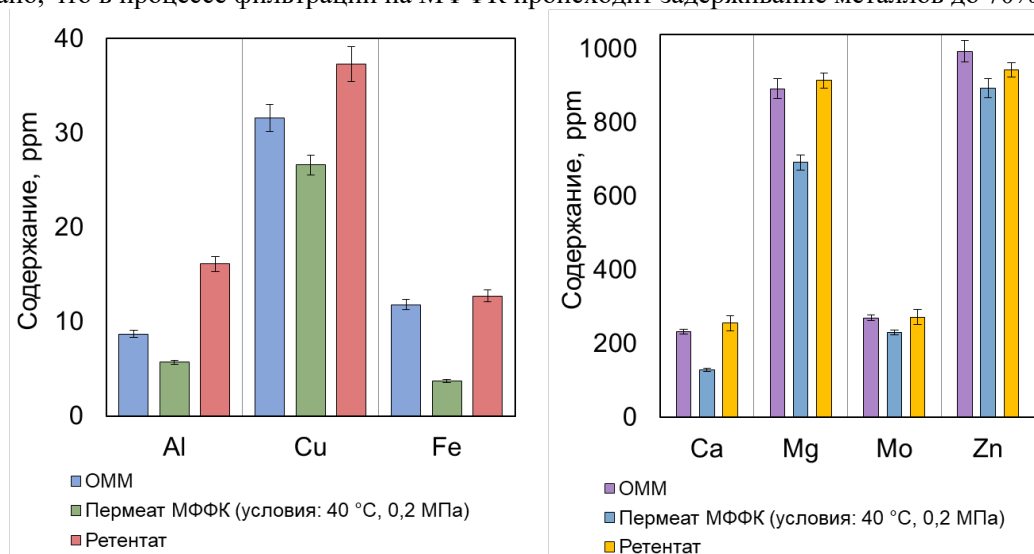


Рисунок 3- Анализ содержания металлов в образцах фильтрации на МФФК при температуре 40 °С и давлении 0,2 МПа

Таким образом, в процессе микро- и ультрафильтрации на трубчатых полимерных мембранах при умеренных температурах (40 °С) происходит задерживание различных твердых частиц, металлов, продуктов полимеризации и окисления. Однако использованные промышленные мембраны не позволяют полностью очистить масло от накопившихся в нём нежелательных компонентов, поэтому в данной работе проведено исследование по доочистки пермеата с первой ступени с использованием лабораторных мембран из полиакрилонитрила с размером пор 4-17 нм. Данные мембраны позволяют дополнительно снизить содержание в масле металлов.

Заключение

В данной работе исследована возможность очистки отработанного моторного масла (ОММ) с использованием двухступенчатой баромембранной фильтрации с применением коммерческих и лабораторных микро- и ультрафильтрационных полимерных мембран. Показано, что мембранная фильтрация позволяет эффективно удалять загрязняющие компоненты, включая твердые частицы, продукты полимеризации и окисления, а также тяжелые металлы, улучшая физико-химические характеристики отработанного масла. Для более глубокой очистки пермеата, полученного на первой стадии фильтрации отработанного масла на промышленных трубчатых мембранах МФФК/УФФК, использованы лабораторные ПАН-мембраны с более узким размером пор. Таким образом, баромембранная фильтрация представляет собой перспективную технологию для регенерации отработанного моторного масла, обеспечивая его эффективную очистку без необходимости использования дополнительных химических реагентов или сложных дистилляционных процессов.

Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 24-63-00026).

Список литературы

1. A.V.Markelov, A.P.Nebesskaya, Yu.V.Shvorobey, A.A.Yushkin, A.V.Volkov, V.V.Volkov. Regeneration of used engine oil with ultrafiltration membranes // Processes of Petrochemistry and Oil Refining. 2024. V. 25 №4. P. 1064-1071.
2. Nebesskaya A., Kanateva A., Borisov R. et al. Polyacrylonitrile ultrafiltration membrane for separation of used engine oil // Polym. 2024. V. 16(20). P. 2910.
3. А.П. Небесская, А.В. Балынин, А.А. Юшкин, А.В. Маркелов, В.В. Волков. Ультрафильтрационное разделение нефти и отработанных масел // Мембраны и мембранные технологии. 2024. Т. 14. № 5. С. 422-430.

УДК 66.01

Анашкин И.П.

Язык программирования julia в образовании и инженерных расчетах по процессам и аппаратам химической технологии

Анашкин Иван Петрович – к.т.н., доцент кафедры ПАХТ; anashkin.ivan@kstu.ru;

ФГБОУ ВО «КНИТУ»,

Россия, Казань, 420015, ул. Карла Маркса, 68.

Рассмотрено применение языка программирования julia для решения задач химической технологии. Описаны пакеты для расчета термодинамических и транспортных свойств веществ, моделирования динамических процессов. Приведены примеры применения для дисциплин, читаемых на кафедре ПАХТ ФГБОУ ВО «КНИТУ».

Ключевые слова: численные методы, фазовое равновесие, решение уравнений, динамические модели.

Julia programming language in education and calculations of chemical engineering processes

Anashkin I.P.

KNRTU, Russia, Kazan, 420015, Karl Marx St., 68

The application of the julia programming language for solving chemical engineering problems is considered. Libraries for calculating thermodynamic and transport properties of substances, dynamic simulation of processes are described. Examples of application for disciplines taught at the Department of Chemical Engineering are given.

Key words: numerical methods, phase equilibrium, solving equations, dynamic models.

Введение

Для качественного инженерного образования нужна совокупность теоретической подготовки по дисциплине, знаний математической базы и умения пользоваться программными пакетами для решения поставленных задач. Зачастую освоение студентами программных продуктов происходит непоследовательно. Например, после курса процессов и аппаратов химической технологии студенты сразу сталкиваются с программами моделирования химико-технологических систем (например, dwsim [1]) без понимания моделей, заложенных в эти программы.

За последние десятилетия теоретические основы химической технологии не изменились и подходы к решению задач, решаемых студентами, остается таким же. Однако с развитием вычислительной техники изменились методы решения. Но в методической литературе к выполнению инженерных расчетов встречаются архаичные методы, например использование графических методов решения систем уравнений, использованием номограмм для расчета свойств и т. д.

В данной работе описаны примеры использования языка программирования julia и разработанных для него пакетов для инженерных и научных расчетов, выполняемых студентами.

Язык программирования julia

Время, отведенное на самостоятельную работу студента, составляет около 50% времени, отведенного на дисциплину. Поэтому главным критерием выбора языка программирования julia являлось свободное распространение и возможность полноценно использовать студентами в любое время и в любом месте. По этой причине отказались от Mathcad (ранее часть дисциплин вели с использованием данного пакета). Также были отброшены варианты с достаточно сложным порогом входа (языки с ручным управлением памяти) и ограниченным набором прикладных библиотек. Из двух вариантов python и julia была выбрана julia в связи с большей производительностью.

Одной из сформированных в последнее время концепция языка julia является решение проблемы «двух языков». Существуют языки с достаточно простым синтаксисом и низким порогом входа, но при этом обычно они обладают низкой производительностью, что заставляет для «узких» мест использовать высокопроизводительные языки или даже полностью переписывать модель на другом языке. Использование julia позволяет решить данную проблему, и пакеты, написанные на ней, имеют достаточно высокую скорость выполнения. Производительность очень важна при масштабировании задачи от отдельного аппарата до химико-технологической схемы.

Пакеты

Для языка программирования julia написано множество прикладных пакетов. Пакеты представляют из себя проекты с открытым исходным кодом на сайте github.com. В преподаваемых дисциплинах находят применение следующие пакеты:

- работа с полиномами [2];
- регрессионный анализ [3];
- решение уравнений [4];
- решение систем алгебраических уравнений [5];
- решение систем дифференциальных уравнений [6];
- решение краевых задач [7];
- решение дифференциальных уравнений с частными производными [8].

Для построения графиков разработано множество пакетов:

- Plots.jl [9];
- Makie.jl [10];
- Gadfly.jl [11] и др.

Библиотеки для расчета физико-химических свойств чистых веществ и смесей

Один из важных этапов расчетов является задание физико-химических свойств веществ. В настоящее время студенты в основном пользуются справочными таблицами, в которых собраны экспериментальные данные. Однако это не всегда удобно, т. к. одно и то же свойство может требоваться на разных этапах расчета несколько раз. Поэтому одним из вариантов является аппроксимация, какой-либо функцией или использование библиотек для расчета свойств.

Пакет CoolProp [12] содержит уравнения состояния для 124 веществ. В качестве уравнения состояния используются модификации SAFT уравнения состояния, данные уравнения содержат множество параметров (например, для описания свойств воды используется более 200 параметров). Поэтому они работают в широкой области состояния. Типичные значения отклонения от экспериментальных данных не более 3% (5 % в окологкритической области). Большая часть заложенных в пакете уравнений состояния опубликованы в журнале J. Phys. Chem. Ref. Data, специфицирующим на публикации точных данных для моделирования процессов. Использование правил смешения позволяет определять также свойства смесей, но в данном случае лучше проводить проверку адекватности по экспериментальным данным.

Для некоторых веществ в данной библиотеке также заложены модели для описания коэффициентов вязкости и теплопроводности. Также реализована функция для описания свойств водяного пара. Данный пакет широко применяется для гидравлических, тепловых расчетов, расчета сушильных аппаратов.

Пакет Clapeyron.jl [13] также используется для расчета термодинамических свойств, однако в нем упор делается на многокомпонентные смеси. В данном пакете реализовано множество подходов для описания парожидкостного равновесия: кубические уравнения состояния (различные модификации уравнения Пенга-Робинсона, Соаве-Редлиха-Квонга и т.д.), SAFT уравнения состояния (CPA, PCSAFT, softSAFT и др.), модели на основе коэффициентов активности (NRTL, UNIFAC, Вильсона и др.). Данная библиотека может быть использована для расчета процессов ректификации и дистилляции. Также при обработке экспериментальных данных при настройке модели равновесия.

Динамическое моделирование

Динамические модели хотя и реже чем статические, но применяются для моделирования объектов химической технологии. В основном целью является создание тренажеров для операторов и аппаратчиков химических производств для отработки внештатных ситуаций и получения допусков. Для создания динамических моделей в julia разработан пакет ModelingToolkit [14]. Данный пакет позволяет проводить объектное моделирование, суть которого заключается в описании работы каждого из аппаратов системы с помощью алгебраических и дифференциальных уравнений. Аппараты, которые описываются дифференциальными уравнениями с частными производными, преобразуются к системе обычных дифференциальных уравнений.

Соединяя входящие и выходящие потоки с различных аппаратов, можно создать химико-технологическую систему. С точки зрения модели данная система представляет систему алгебраически-дифференциальных уравнений. С помощью символьных вычислений данная система может быть сокращена, а решение получено с помощью численных методов. В настоящее время язык программирования julia и библиотеку ModelingToolkit активно внедряют в виде веб сервиса для инженерных расчетов engEE [15]. Данная платформа позиционируется как замена программным продуктам Matlab/Simulink, ушедшим с рынка РФ.

Дисциплины

Подход к освоению знаний, умений и навыков студентами должен быть основан на принципах: последовательного изложения для формирования общей картины мира (каждая дисциплина должна дополнять какую-либо последующую или быть использована в профессиональной деятельности), унификации с точки зрения подхода к использованию инструментов, в том числе программных продуктов. Унификация и сквозная цифровизация образовательного процесса позволит закрепить навыки работы с программами продуктами, а также в области разработки свои программ.

С точки зрения подхода к преподаванию освоение базовых навыков работы с языком программирования julia, по-хорошему, должно происходить на начальных курсах на дисциплине, связанной с информационными технологиями. Однако уровень компетенций и нежелание преподавателей изменять содержание дисциплины приводят к тому, что описанный ниже подход применяется лишь к студентам направления 15.05.01 «Проектирование технологических машин и комплексов». Освоение базовых навыков использования языка программирования julia для инженерных расчетов начинается на втором курсе с дисциплины «Методы решения инженерных задач». В дальнейшем полученные навыки используются на дисциплинах «ПАХТ», «Разделение многокомпонентных смесей», «Проектирование химических реакторов», «Моделирование и оптимизация химико-технологических процессов» и других.

Отдельно стоит отметить дисциплину магистров передовой инженерной школы «Разработка точных математических моделей химико-технологических процессов». Данная дисциплина возникла после запроса со стороны разработчиков программного обеспечения импортозамещающего программы технологического моделирования (например Hysys). В рамках данной дисциплины магистры разрабатывают статические и динамические модели в рамках единого, связанного пакета. Особенностью дисциплины является вариативность заданий, которые выполняют магистры. Например, в первый год были реализованы базовые модели задания материальных потоков, смесители, разветвители, сепараторы двухфазных потоков, теплообменники. Результаты выложены в открытый доступ [16]. В последующие годы данный пакет будет дополнен гидравлическими расчетами, расчетами колонных аппаратов потарелочным расчетом, расчетом химических реакторов и т.д.

Заключение

Стоит отметить, что язык julia является языком общего назначения, и не имеет узкой направленности под определенные задачи. Разработаны пакеты для создания графических интерфейсов [17,18], веб-интерфейсов [19], обработки данных с любительских [20] и промышленных контроллеров [21]. Это позволяет применять его не только для расчетов, но и создавать полноценные программные продукты. Например с помощью данного языка программирования созданы две лабораторные установки на кафедре ПАХТ ФГБОУ ВО «КНИТУ» [22,23].

Список литературы

1. dwsim [Online]. URL: <https://dwsim.org/>.
2. Polynomials.jl [Online]. URL: <https://github.com/JuliaMath/Polynomials.jl>.
3. LsqFit.jl [Online]. URL: <https://github.com/JuliaNLSolvers/LsqFit.jl>.
4. Roots.jl [Online]. URL: <https://github.com/JuliaMath/Roots.jl>.
5. NLSolve.jl [Online]. URL: <https://github.com/JuliaNLSolvers/NLSolve.jl>.
6. DifferentialEquations.jl [Online]. URL: <https://docs.sciml.ai/DiffEqDocs/stable/>.
7. BoundaryValueDiffEq.jl [Online]. URL: https://docs.sciml.ai/DiffEqDocs/stable/tutorials/bvp_example/#Boundary-Value-Problems.
8. MethodOfLines.jl [Online]. URL: <https://github.com/SciML/MethodOfLines.jl>.
9. Plots.jl [Online]. URL: <https://docs.juliaplots.org/stable/>.
10. makie.jl [Online]. URL: <https://makie.org/website/>.
11. Gadfly.jl [Online]. URL: <https://gadflyjl.org/stable/>.
12. Bell I.H. et al. Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp // Ind. Eng. Chem. Res. 2014. V. 53, № 6. p. 2498–2508.
13. Clapeyron.jl [Online]. URL: <https://github.com/ClapeyronThermo/Clapeyron.jl>.
14. ModelingToolkit.jl [Online]. URL: <https://docs.sciml.ai/ModelingToolkit/stable/>.
15. engee [Online]. URL: <https://start.engee.com/>.
16. ACE.jl [Online]. URL: <https://github.com/KSTU/ACE.jl>.

17. Gtk.jl [Online]. URL: <https://juliagraphics.github.io/Gtk.jl>.
18. QML.jl [Online]. URL: <https://github.com/JuliaGraphics/QML.jl>.
19. Genie.jl [Online]. URL: <https://genieframework.com/>.
20. LibSerialPort.jl [Online]. URL: <https://juliaio.github.io/LibSerialPort.jl/stable/>.
21. Modbus.jl [Online]. URL: <https://github.com/nkottary/Modbus.jl>.
22. Анашкин И.П. Методика экспериментального изучения процесса теплообмена с использованием имитационных моделей в реальном времени // Вестник Технологического Университета. 2024. V. 27, № 9. p. 99–103.
23. Анашкин И.П. et al. Цифровая модернизация лабораторной установки по изучению структуры потока в аппаратах // Вестник Технологического Университета. 2024. V. 27, № 9. p. 90-94.

УДК 372.862

Богданов И.А., Киргина М.В., Алтынов А.А.

Преподавание дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии» в ВУЗе: запрос индустрии и возможности университетов

Богданов Илья Александрович – к.т.н., старший преподаватель НОЦ Н.М. Кижнера;
bogdanov_ilya@tpu.ru.

Кирина Мария Владимировна – к.т.н., доцент Отделения химической инженерии;

Алтынов Андрей Андреевич – к.т.н., м.н.с. Исследовательской школы химических и биомедицинских технологий;

ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30.

В тезисах рассмотрены современное состояние и перспективы преподавания дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии» в Высших учебных заведениях, в том числе при взаимодействии с индустриальными партнерами.

Ключевые слова: процессы и аппараты химической технологии, промышленный партнер, химическая технология, дополнительное профессиональное образование, виртуальные тренажеры

Teaching the discipline “Processes and apparatuses of chemical technology” in the university: the demand of the industry and the possibilities of universities

Bogdanov I.A., Kirgina M.V., Altynov A.A.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

The theses discuss the current state and prospects of teaching the discipline “Processes and apparatuses of chemical technology” in higher educational institutions, including in cooperation with industrial partners.

Key words processes and apparatuses of chemical technology, industrial partner, chemical engineering, additional professional education, virtual simulators

Введение

Современная система инженерного Российского образования сформировалась на базе системы образования СССР, однако в случае высшего образования дополнительно была интегрирована в так называемую болонскую систему. Следствием чего, стало то, что отработанный десятилетиями Советский специалитет был разбит на две ступени: бакалавриат и магистратуру. Однако в процессе данного перехода не были устранены важнейшие нестыковки. Фактически студент, отучившийся в специалитете, на выходе получал диплом специалиста и был готов к самостоятельной работе поскольку получил как базовое образование, так и углубленную специальную подготовку в рамках выбранной специальности (в том числе прошел несколько длительных практик на производстве) [1]. При этом студент, отучившийся в бакалавриате, получает так называемое базовое образование без углубленной специальной подготовки и длительных производственных практик [2].

Именно в этом и кроется одна из главных нестыковок современной системы высшего образования. По факту мы получаем выпускников, обладающих теоретическими базовыми знаниями, но не имеющих необходимую практическую подготовку. Казалось бы, эту проблему должна была решить магистратура, но магистратура – это академическое образование (первая ступень в научную карьеру) и практических навыков реального производства она, к сожалению, не дает.

Отдельно нужно обозначить все больший охват населения высшим образованием: за последние 30 лет уровень высшего образования в России вырос почти втрое: более 31 % населения в возрасте от 25 до 65 лет окончили ВУЗ [3].

При этом экономика Российской Федерации развивается, появляются все новые передовые химические производства, которые требуют наличия квалифицированных кадров в стране.

Ранее, сотрудников на должности рабочих эффективно готовили техникумы и училища. Среднеспециальное образование сохранилось и сейчас, и интерес школьников к нему в последнее время возрастает, однако, на фоне престижности высшего образования и желания родителей обеспечить это образование своим детям получение высшего образования все же остается в приоритете при выборе будущей образовательной траектории. Выпускники ВУЗов же чаще устраивались на стартовые, но все же инженерно-технические, а не рабочие должности.

Описанные выше факторы нашли свой отклик в индустрии, и сейчас выпускники ВУЗов как правило, имея высшее образование вынуждены устраиваться на рабочие специальности, высшее образование для которых в общем-то и не нужно. Это обусловлено сразу несколькими факторами:

1. Количество выпускников техникумов и училищ недостаточно для покрытия недостатка специалистов при активно развивающейся экономике;

2. Выпускники бакалавриата не обладают достаточной практической подготовкой, что не позволяет нанимать их не на рабочие должности;

3. Магистратура в большинстве случаев является началом научной карьеры, подготовкой к аспирантуре и последующей защите диссертации на соискание ученой степени, а не практической подготовкой на производстве.

Обозначенные выше проблемы нашли свое отражение и в преподавании такой дисциплины как «Процессы и аппараты химической технологии» в университетах.

Университеты, оставаясь все-таки структурами, дающими высшее, а не специальное образование реализуют преподавание этой дисциплины очень фундаментально. Немаловажным так же является политика сокращения аудиторной нагрузки на предметы. Ранее учебный курс «Процессов и аппаратов химической технологии» был сформирован таким образом, что теория и фундаментальные основы изучались в рамках лекционных занятий, расчеты и проектирование аппаратов проходили в рамках практических занятий, а лабораторные занятия как раз были посвящены практическому изучению оборудования. Снижение же количества аудиторных часов привело к тому, что в первую очередь сократили лабораторные занятия и урезали практическую подготовку в рамках лекций. Это решение кажется логичным с позиции университета, ведь он должен обеспечивать фундаментальную, а не практическую подготовку. Но по мнению индустрии – это абсолютно нелогичное решение, поскольку они получают выпускника, который знает наизусть уравнение неразрывности потока, или теоретическое устройство оборудования, которое никогда в реальной жизни не видел.

К тому же индустрия также не хочет, а зачастую и не может себе позволить несколько лет фактически доучивать выпускников практическим навыкам.

Программы дополнительного профессионального образования

Одно из решений сложившейся ситуации в Томском политехническом университете было найдено в рамках реализации, совместных с промышленными партнерами, программ дополнительно профессионального образования (ДПО). Так студенты на третьем или четвертом курсе поступают на одно- или двухгодичную программу, в рамках которой дополнительно получают очень практически направленные курсы: «Процессы и аппараты химической технологии» и «Ведение процессов на технологических установках» [4, 5]. При этом важно отметить, что данное обучение реализуется параллельно с основным, что позволяет по окончании основного обучения получить готового специалиста. Для индустрии в данном случае также появляется возможность подготовить для работы на своих предприятиях не только студентов технических (профильных) ВУЗов, но и провести выравнивание знаний и навыков, при прохождении данной программы, студентов из классических или вообще непрофильных вузов (сельскохозяйственных, морских, педагогических и т.д.), что позволяет значительно сократить как потребность в специалистах, так и время их интеграции в компании.

Приборная база

Еще одной немаловажной проблемой является устаревание приборной базы для реализации практической подготовки. Выделяемого университетам финансирования как правило всегда недостаточно, и предпочтение на обновление приборной базы отдается в пользу общетехнических дисциплин, охватывающих большее количество студентов таких, например, как общая физика или химия. Профильная подготовка, как следствие, остаётся недофинансированной.

Решением этой проблемы видится более тесное взаимодействие с промышленными партнерами. Например, промышленный партнер может создать на базе университета технологический центр с оборудованием. Положительные стороны такого подхода очевидны для обеих сторон. Университет получает новое оборудование для более качественного обучения студентов, а промышленный партнер получает специалистов, которые уже умеют работать на оборудовании аналогичном тому, что используется на предприятиях партнера.

Цифровизация

Говоря о развитии и преобразовании процесса преподавания любой дисциплины в ВУЗе в том числе Процессов и аппаратов химической технологии, невозможно обойти вниманием все более развивающуюся тенденцию на цифровизацию образования. Наиболее активно данный процесс был запущен в период пандемии 2020-2023 годов. В этот период даже при наличии качественного

оборудования для практической подготовки специалистов в ВУЗе реализовать ее не представлялось возможным вследствие логистических ограничений.

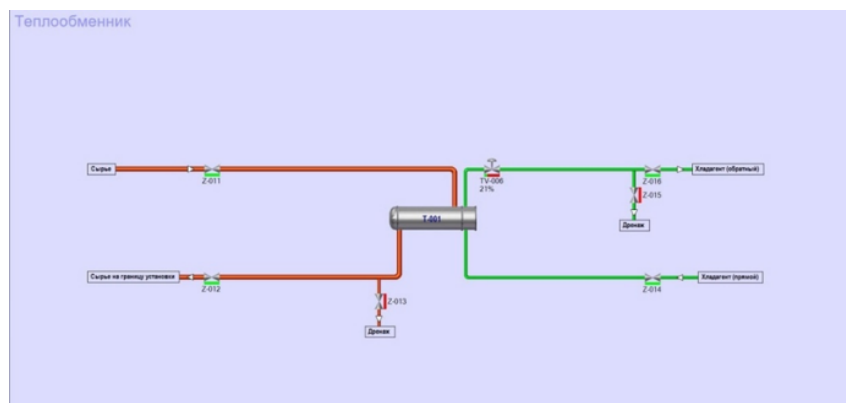


Рисунок 1 - Динамическая схема кожухотрубчатого теплообменника в ПО RTsim [7]

Решением данной проблемы в Томском политехническом университете стало использование существующих, а затем и разработка собственных симуляторов технологических машин и процессов. Одним из первых партнеров университета в этом вопросе стала компания RTsim, предоставившая одноименное ПО для подготовки специалистов (Рисунок 1) [6].

Создание собственных виртуальных тренажеров технологических процессов стало следующим важным шагом в цифровизации процесса преподавания «Процессов и аппаратов химической технологии». Данный шаг в Томском политехническом университете также был реализован при взаимодействии с производственными партнерами, что позволило разработать не просто общие, базирующиеся на теоретических положениях, тренажеры, а положить в основу тренажеров реальные производственные схемы, задачи и даже упрощенные варианты отработки технологических режимов.

Кроме того, немаловажным является то, что создание виртуальных тренажеров позволяет готовить специалистов удаленно, что в последнее время становится все более актуальной формой подготовки.

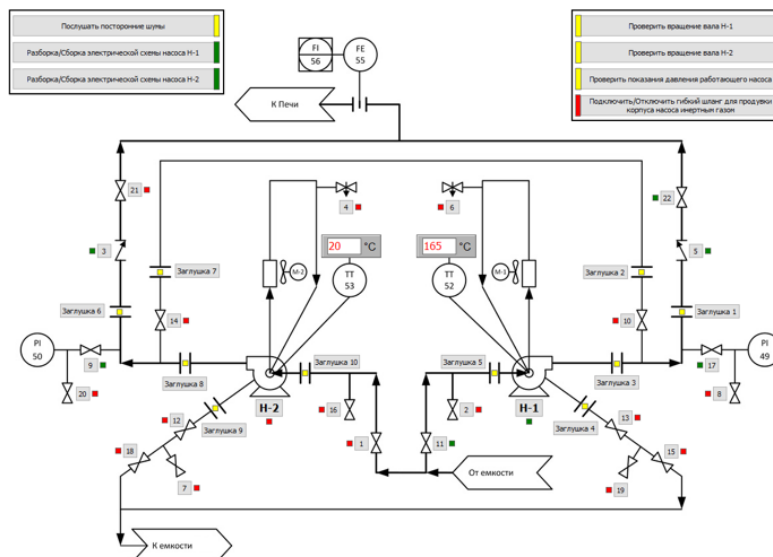


Рисунок 2 - Пример разработанного в Томском политехническом университете виртуального тренажера для отработки навыков по пуску/останову насосного оборудования

Заключение

Таким образом, курс «Процессы и аппараты химической технологии» продолжает оставаться важнейшей комплексной и системообразующей инженерной дисциплиной, которой следует уделять намного больше внимания при подготовке химиков-технологов. Несмотря на прошедшие десятилетия и активное развитие промышленности в Российской Федерации большинство проблем в

области подготовки кадров химической промышленности с точки зрения именно инженерной подготовки по-прежнему остаются нерешёнными. Повышение качества преподавания дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии» напрямую будет повышать эффективность производств. Важно помнить, что от уровня знаний процессов и аппаратов химической технологии зависит уровень экологической безопасности химических производств, правильная организация процессов, грамотный выбор их аппаратно-технологического оформления, что в конечном счете напрямую влияет на экономику, позволяя значительно повысить глубину переработки исходных продуктов, увеличивать удельный выход конечных продуктов, снизить, а в ряде случаев и исключить выброс вредных веществ в окружающую среду.

Список литературы

1. Специалитет в России в 2025 году // KP.RU. URL: <https://www.kp.ru/edu/spetsialitet-v-rossii/> (дата обращения: 01.03.25).
2. Что такое бакалавриат и какое это образование. Чем он отличается от специалитета и магистратуры // РБК Life. URL: <https://www.rbc.ru/life/news/66a7b0df9a79473962c651bd#c651bd-contents-p2> (дата обращения: 01.03.25).
3. Количество россиян с высшим образованием превысило 31 процент // Интернет-портал «Российской газеты» URL: <https://rg.ru/2021/06/15/kolichestvo-rossiian-s-vyshhim-obrazovaniem-prevysilo-31-procent.html> (дата обращения: 01.03.25).
4. Студенты Томска могут стать участниками целевой программы и построить карьеру в СИБУРе // ООО «ТОМСКНЕФТЕХИМ» URL: <https://www.sibur.ru/TomskNeftehim/press-center/studenty-tomska-mogut-stat-uchastnikami-tselevoy-programmy-i-postroit-kareru-v-sibure/> (дата обращения: 01.03.25).
5. Программа РОСТ // Корпоративная программа развития студентов ЕвроХим: РОСТ URL: <https://rost-praktika.ru/#!/tab/723208741-3> (дата обращения: 01.03.25).
6. ООО «РТСИМ» URL: <https://rtsim.ru> (дата обращения: 01.03.25).
7. Что такое кожухотрубный теплообменник? // [Официальное сообщество компании РТСИМ в социальной сети ВК] URL: https://vk.com/rtsim1?z=photo-195216011_457240313%2F0de7826f41b1fc1ce0 (дата обращения: 01.03.25).

УДК 377.6, 66.0

Гилевская О.В., Усачева У.О.

Реализация образовательной деятельности у студентов среднего профессионального образования на примере дисциплины «Процессы и аппараты»

Гилевская Ольга Владимировна – ассистент кафедры процессов и аппаратов; olga4er@gmail.com.

Усачева Ульяна Олеговна, магистрант;

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)»,

Россия, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 24-26/49, литер А.

В тезисах рассмотрены перспективы развития среднего профессионального образования в области инженерного дела, технологий и технических наук и проблемы поступления абитуриентов. Затронуты проблемы возникающие в процессе обучения современной молодежи на примере изучения дисциплины «Процессы и аппараты» и проблемы, возникающие при взаимодействии с потенциальными работодателями. Предложены меры по увеличению эффективности освоения необходимых компетенций, приобретаемых в ходе обучения. Рассмотрены новые государственные инициативы, создание производственных центров (кластеров), федеральный проект «Профессионалитет».

Ключевые слова: среднее профессиональное образование, студенты, процессы и аппараты, навыки.

Implementation of educational activities among students of secondary professional education on the example of the discipline «Chemical technology»

Gilevskaya O.V., Usacheva U.O.

St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Saint Petersburg, Russian Federation

The paper consider the prospects for the development of secondary vocational education in the field of engineering, technology and technical sciences and the problems of admission of undergraduate students. The problems that arise in the process of educating modern youth are discussed using the example of studying the discipline «Chemical technology» and the problems that arise when interacting with potential employers. Measures are proposed to increase the effectiveness of mastering the necessary competencies acquired during training. New government initiatives, the creation of production centers (clusters), and the federal project «Professionalism» were considered.

Key words: secondary vocational education, students, chemical technology, skills.

Введение

Согласно опубликованным материалам, прием абитуриентов на специальности среднего профессионального образования (СПО) увеличился более чем на треть за период с 2016 по 2024 год [1,2], что отражает растущую популярность рабочих профессий. Причем, анализируя статистические данные об обучающихся по областям образования за 2022 год, исследователи НИУ ВШЭ [3] отмечают, что наибольшую долю (46,7%) составляют студенты СПО в области инженерного дела, технологий и технических наук. Рост интереса выпускников к обучению по инженерным программам также обусловлен увеличением количества бюджетных мест, которых в 2024 году было выделено свыше 400 тысяч [4]. Многие родители, отмечая проблемы школьного образования, стремятся дать ребенку востребованную на рынке труда профессию, которая уже через пару лет обучения позволит ему зарабатывать деньги. С учетом вышеперечисленного, очевидно, что в ближайшее время актуальность задач, связанных с реализацией образовательных программ СПО будет сохраняться.

Основная часть

Центр среднего профессионального образования при университете СПбГТИ(ТУ) (далее – ЦСПО СПбГТИ(ТУ)), который осуществляет подготовку специалистов на базе общего среднего образования по инженерным направлениям: 18.02.09 – Переработка нефти и газа, 18.02.12 – Технология аналитического контроля химических соединений (очная форма обучения), а также по экономическим направлениям [5]. Срок обучения составляет 2 года и 10 месяцев. В дальнейшем планируется расширение ЦСПО, благодаря увеличению количества мест, а также введению нового направления 18.02.15 – Биохимическое производство. Все вышеперечисленные направления ориентированы на подготовку кадров, способных к работе на современных химических, пищевых и нефтеперерабатывающих предприятиях. Одной из важнейших общепрофессиональных дисциплин в процессе обучения выступают «Процессы и аппараты», которую студенты осваивают, выполняя лабораторные работы с последующим оформлением отчетов и решая задачи. Согласно

утвержденным рабочим программам [6], разработанных на основе ФГОС [7], по результатам освоения студент должен уметь работать с технологическими схемами, обоснованно подбирать технологические решения (оборудование, схемы) с использованием каталогов, ГОСТ, проводить расчеты характеристик и параметров оборудования в соответствии с современными требованиями по безопасности и условиями конкретного производства. Формирование вышеперечисленных компетенций возможно при сочетании эффективной организации образовательной деятельности, педагогического мастерства и методичной работы обучающихся. Однако в настоящее время последний фактор сопряжен с определенными трудностями. Во-первых, психика современных подростков формируется в период интенсивного развития электронной техники. С одной стороны, технический прогресс позволяет внедрять новые форматы получения знаний, например, изучать технологические установки на безопасных моделях благодаря компьютерному моделированию. С другой стороны, повышение доступности карманных устройств привело к понижению способности к длительному удержанию концентрации внимания. Данные проблемы приводят к тому, что студентам приходится уделять много внимания в индивидуальном формате. А дополнительная нагрузка преподавателей в таком случае учебным планом не предусматривается, что влечет за собой дополнительное напряжение во взаимодействии с обучающимися.

Во-вторых, в настоящее время в среднем уровень образовательной подготовки студентов СПО оставляет желать лучшего. Отчасти это связано с тем, что прием студентов во многие колледжи и техникумы осуществляется по аттестату о среднем общем образовании, т.е. на базе 11 классов. Однако в большинстве школ обучение в старших классах выстроено по специализированной программе обучения «профильных классов», вследствие чего количество учебных часов по физике и химии, мало или вообще отсутствуют в некоторых классах. Из-за этого возможна ситуация, при которой на занятиях по предмету «Процессы и аппараты» у учебной группы очень разный уровень знаний: одна часть студентов обучалась в профильных технологических и химико-биологических классах, а другая часть с трудом может сформулировать базовые законы физики и химии. Если раньше в ЦСПО попадали студенты, которые плохо написали ЕГЭ, то теперь это, как правило, школьники, которые его и не пытались сдавать. Аттестаты с высоким средним баллом совершенно не отражают уровень школьных знаний. Тем не менее, и ранее наблюдалась ситуация, при которой конкуренцию выпускникам школ крупнейших городов составляли абитуриенты из других городов, где уровень образования и требований значительно ниже, чем в столичном регионе или в Санкт-Петербурге. Бюджетные места при таком подходе зачастую достаются заведомо слабым студентам. Вероятно, эту проблему могли бы решить дополнительные вступительные испытания: экзамены или собеседования по профильным предметам.

В-третьих, дисциплина «Процессы и аппараты» в ЦСПО СПбГТИ(ТУ) реализуется на протяжении первых двух семестров на 1 курсе. Однако для качественного усвоения теоретических основ основных тепло- и массообменных процессов необходимы хотя бы представления об инструментах и понятиях базовой университетской математики и физической химии. Курс физической химии на данный момент реализуется во втором семестре. Таким образом, семестровая нагрузка представлена как учебными дисциплинами, позволяющими наверстать школьные предметы, так и абсолютно новыми и незнакомыми для студентов. К тому же, отсутствует система адаптации студентов СПО к новому для них формату университетских занятий: после стандартного занятия длиной в 45 минут тяжело перестроиться на занятия длительностью вдвое больше. Таким образом, необходима организация учебного процесса таким образом, чтобы распорядок дня был оптимальным, иначе студент не будет продуктивен. Эта сложная психолого-педагогическая задача требует нескольких подходов (как минимум, сочетание медико-физиологических и социально-профессиональных аспектов) [8].

Достаточно много времени в процессе изучения дисциплины «Процессы и аппараты» уделяется формированию базовых навыков, которые необходимо приобретать еще на ступени общего образования: построение графиков, технологических схем, таблиц, использование справочных данных. Отсутствие черчения в большинстве школ, как отдельного школьного предмета, очень негативно сказывается на развитии пространственного воображения и графических навыков, логического мышления и моторики у обучающихся. Также проблемы наблюдаются с уровнем школьных знаний по следующим предметам: физике, химии, математике и информатике. Данная проблема связана с дефицитом квалифицированных кадров в школах. Срок обучения студентов СПО в области инженерного дела, технологий и технических наук с учетом вышеизложенных проблем категорически нельзя уменьшать.

Помимо всего вышеперечисленного, в настоящее время представители действующих предприятий отмечают дефицит кадров, однако нередко отказывают в приеме на работу выпускников учреждений СПО по причине недостаточного количества актуальных знаний для конкретной специальности. Отчасти это связано с недостаточной современностью материально-технической базы учреждений. Ввиду этого очевидна необходимость обновления лабораторных установок, увеличение часов производственной практики и привлечение производств к участию в образовательном процессе ЦСПО. Вовлечение предприятий в России планируется в рамках федерального проекта «Профессионалитет», который является одной из составляющих комплекса инициатив в области социально-экономического развития России до 2030 года. Суть проекта заключается в создании образовательно-производственных центров (кластеров), представляющих собой интеграцию в образовательный процесс организаций реального сектора экономики [9]. Данная инициатива может способствовать повышению обеспеченности образовательных организаций площадью учебно-лабораторных корпусов, которая, согласно статистическому отчету [10] 2022 года, снижалась с 2016 по 2020 год. Развитие СПО возможно также благодаря программе ранней профориентации «Россия – мои горизонты» для школьников 6-11 классов, который позволит увлечь абитуриентов профессиями, входящих в перечень 50 наиболее востребованных профессий [11].

Заключение

Уровень освоения необходимых компетенций студентами ЦСПО увеличится, если изначально прием на обучения будет происходить не только на основании аттестата об окончании 11 классов, но с учетом результатов дополнительных вступительных испытаний или результатов собеседования по профильным предметам на базе ЦСПО. Без активного участия работодателей в процессе обучения, без допуска на промышленные площадки, без создания образовательно-производственных центров (кластеров) выпуск студентов, отвечающих требованиям современных промышленных предприятий невозможен в необходимых для нашей страны объемах.

Список литературы

1. В 2018-2022 гг прием учащихся в учреждения среднего профессионального образования в России вырос на 16,2%: с 0,99 до 1,15 млн чел. / [Электронный ресурс] // РБК Магазин исследований: [сайт]. — URL: <https://marketing.rbc.ru/articles/14385/> (дата обращения: 16.02.2025).
2. В колледжах России начнут обучение более 1,25 млн студентов / [Электронный ресурс] // ТАСС: [сайт]. — URL: <https://tass.ru/obschestvo/21690755> (дата обращения: 16.02.2025).
3. Перегрузка системы среднего профессионального образования в России / [Электронный ресурс] // ИСИЭЗ – НИУ ВШЭ: [сайт]. — URL: <https://issek.hse.ru/news/783551284.html> (дата обращения: 16.02.2025).
4. Итоги приемной кампании СПО-2024 / [Электронный ресурс] // Вузопедия.СПО: [сайт]. — URL: <https://vuzopedia.ru/spo/journal/articles/postuplenie-spo/itogi-priemnoy-kampanii-spo-2024> (дата обращения: 16.02.2025).
5. Центр среднего профессионального образования / [Электронный ресурс] // Технологический институт: [сайт]. — URL: https://spbti.ru/fakulteti/tcentr_srednego_professionalnogo_obrazovaniya (дата обращения: 16.02.2025).
6. Сведения об образовательной организации / [Электронный ресурс] // Технологический институт: [сайт]. — URL: <https://spbti.ru/sveden> (дата обращения: 16.02.2025).
7. Приказ Министерства просвещения России от 17.11.2020 № 646 «Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования по специальности 18.02.09 Переработка нефти и газа». / [Электронный ресурс] // ФГОС - федеральные государственные образовательные стандарты: [сайт]. — URL: <https://fgos.ru/fgos/fgos-18-02-09-pererabotka-nefti-i-gaza-646/> (дата обращения: 17.02.2025).
8. Усачева, У. О. Самообразование и профессиональная компетентность в современной системе технического образования / У.О. Усачева // Экономический вектор. – 2023. – Специальный выпуск. – С. 205-207.
9. Федеральный проект «Профессионалитет» / [Электронный ресурс] // Минпросвещения России: [сайт]. — URL: https://edu.gov.ru/activity/main_activities/additional_vocational_education (дата обращения: 16.02.2025).
10. Среднее профессиональное образование в России: статистический обзор / Н. Б. Шугаль, В. И. Кузнецова, Л.Б. Кузьмичева и др.; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». – М.: НИУ ВШЭ, 2022. – 72с.

11. Распоряжение Правительства РФ от 3 сентября 2021 г. № 2443-р. Об утверждении перечня профессий и специальностей среднего профессионального образования, необходимых для применения в области реализации приоритетных направлений модернизации и технологического развития экономики РФ / [Электронный ресурс] // Гарант - законодательство РФ: [сайт]. — URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/402605277/> (дата обращения: 17.02.2025).

УДК 378.1

Кизим Н.Ф., Григорьев В.И.

Междисциплинарный подход в реализации курса процессов и аппаратов химической технологии

Кизим Николай Федорович – доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой «Фундаментальная химия»;

Григорьев Владимир Иванович – кандидат химических наук, доцент кафедры «Фундаментальная химия».

Новомосковский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»,

Россия, Новомосковск, 301650, ул. Дружбы, 8.

Рассмотрены вопросы реализации курса процессов и аппаратов химической технологии основной образовательной программы по специальностям и направлениям подготовки Химическая технология. Обсуждены вопросы содержания курса, создания условий для обучающихся, использования информационных технологий, применения математических пакетов и сложных систем. Показано, что использование современных средств, наряду с традиционными методами преподавания позволяет обучающимся сформировать необходимые компетенции на более высоком уровне.

Ключевые слова: Процессы и аппараты химической технологии, смежные дисциплины, образовательный процесс

Interdisciplinary approach to the implementation of the course on chemical engineering processes and apparatus

Kizim N.F., Grigoriev V.I.

Novomoskovsk Institute of D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Novomoskovsk, Russian Federation, Druzhby st., 8.

The issues of implementation of the course of processes and apparatuses of chemical technology of the main educational program in specialties and areas of training Chemical Technology are considered. The issues of the course content, creation of conditions for students, use of information technologies, application of mathematical packages and complex systems are discussed. It is shown that the use of modern means, along with traditional teaching methods allows students to form the necessary competencies at a higher level.

Key words: Processes and apparatuses of chemical engineering, related disciplines, educational process

Освоение курса «Процессы и аппараты химической технологии» (ПАХТ) способствует обучающемуся сформировать ряд компетенций, определяющих в дальнейшем успешность его работы, как выпускника химико-технологического вуза. Рассматриваемый в курсе ПАХТ материал тесным образом связан с материалом других дисциплин (курсов), входящих в учебные планы образовательных программ по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки (УГСН) 18.00.00. Хотя в настоящее время, единого образовательного пространства в области высшего образования нет, что существенно затрудняет возможное «перемещение» обучающихся, вызванное, например, переменной места жительства или работы, тем не менее, курс ПАХТ имеется в образовательных программах разных вузов. Как показывает анализ учебных планов вузов, осуществляющих подготовку выпускников по данной УГСН, перечень дисциплин (курсов), включаемых в основные образовательные программы высшего образования, мало различается, но названия дисциплин и их содержание могут отличаться заметно. Наблюдается извлечение из курса ПАХТ отдельных разделов и превращение их в самостоятельные дисциплины.

За многие годы подготовки инженеров химиков-технологов в нашей стране сложилась определенная система преподавания курса ПАХТ. Но введение многоуровневого образования привело к диверсификации рабочих программ курса, ввиду необходимости выполнения требований образовательных стандартов, зависящих от статуса вуза и уровня образования. Различались они не только по видам учебных занятий, но и по выделенному числу часов на их проведение и долей самостоятельной работы студентов. Изменялась организация и проведение образовательного процесса. В случае бакалавриата упрощалось рассмотрение теоретических основ, и лабораторный

практикум принимал более демонстрационный характер. В случае специалитета – варьировалось содержание и глубина изложения; в образовательные программы уровня магистратуры вводили дополнительные главы ПАХТ. Тем не менее «ядро» дисциплины входит в образовательные программы всех уровней высшего образования. И это неудивительно, так как курс ПАХТ является «связующим» для многих дисциплин любой образовательной программы инженерного химико-технологического образования.

Целью освоения курса ПАХТ является формирование знаний и умений физического и математического описания процессов гидромеханики, тепло- и массопереноса. Приобретение знаний, умений и навыков позволяет более глубоко осваивать профильные дисциплины образовательной программы химика-технолога.

Совершенно ясно, что при реализации курса ПАХТ должен быть междисциплинарный подход. Однако не совсем ясно, в какой мере и как должны перекрываться разные дисциплины. Повторное рассмотрение одного и того же материала в курсе ПАХТ и в каком-либо другом курсе, несомненно, будет способствовать лучшему усвоению материала, если есть единство в обозначениях, определениях, терминологии. Математика и физика, как дисциплины формирующие общенаучные знания и умения объяснять физические явления и проводить выводы формул и расчеты, являются базисом и здесь вряд ли имеет смысл зауживать их на объекты, рассматриваемые в курсе ПАХТ. Иное дело, если рассматривать взаимопроникновение материалов курсов ПАХТ и, к примеру, физической химии. Материал термодинамики, равновесий жидкость – пар, формальной кинетики, сложных реакций, гетерогенных процессов, рассматриваемый в физической химии необходим для описания процессов ректификации, абсорбции, макрокинетики в курсе ПАХТ. Примеры, рассматриваемые в физической химии, могут быть взяты из курса процессов и аппаратов. Подобным образом можно рассматривать и взаимопроникновение других близких по содержанию дисциплин. Такую тесную связь можно организовать, если авторы – работники кафедр, реализующих смежные дисциплины, подготовят учебно-методическое пособие, показывающее как можно исходя из представлений, характерных для одних дисциплин, излагать (обсуждать) примеры, характерные курсу ПАХТ.

Сложнее обстоит дело в том случае, когда рассматриваются дисциплины в той или иной мере, связанные с информационными технологиями. Базовые знания и умения обращения с математическими программами Excel, Mathcad, Maple и им подобным появляются при освоении рекомендованного модуля «Введение в информационные технологии», включающего дисциплины «Основы информационных технологий» и «Профильное программное обеспечение для решения задач профессиональной деятельности», изучаемые на первом курсе. Самым доступным пока является Excel, входящий в пакет MS Office. Математический пакет (МП) Mathcad, имеющий текстовый и формульный редакторы, более удобен, так как позволяет создавать читаемый документ, в котором показаны и исходные данные, и используемые формулы, и расчетные данные, и графические зависимости. Некоторые затруднения представляет редактирование графиков, переносимых в другие документы. Этот МП в сочетании с каким-либо текстовым редактором, например, Word, используют при выполнении и оформлении индивидуальных расчетных и расчетно-графических заданий, оформлении протоколов лабораторных работ и в других подобных случаях. Графические объекты Excel легче редактируются, результаты расчетов легко переносятся в документ Word, в котором также можно показать расчетные формулы и комментарии. Важно уметь правильно выбрать МП, необходимый для решения конкретной задачи. Но чтобы это сделать, надо знать возможности всех доступных математических пакетов. Но таких знаний нет в полном объеме ни у преподавателей, ни у студентов и выбор используемого пакета определяется в основном его доступностью. Было бы хорошо, если бы в курсе «Профильное программное обеспечение для решения задач профессиональной деятельности» предоставлялся такой обзор с указанием преимуществ и недостатков конкретных МП.

Однако, надо учитывать особенности настоящего времени. Развитие информационных технологий, совершенствование компьютерной техники, повышение их быстродействия и увеличение объема памяти, развитие сети Интернет, появление компактных гаджетов и приложений привнесли новые изменения в жизнь и деятельность человека. Это не могло ни отразиться на образовательном процессе и в высшей школе. В связи с этим появились вопросы, заслуживающие обсуждения, в том числе применительно и к реализации курса ПАХТ.

Во-первых, чему и как учить? Традиционные методы обучения, основанные на теоретическом материале и лабораторных работах, хотя и остаются важными, недостаточны для формирования

комплексных знаний и навыков, необходимых современному специалисту. Изложение материала курса ПАХТ всегда отличалось тщательностью постановки задачи, обоснованием выбора метода решения, подробным изложением аналитического решения с необходимыми пояснениями и детального анализа полученного решения, причем в разных аспектах. Надо ли будущему химику-технологу осваивать, к примеру, аналитические методы решения уравнений нестационарной теплопередачи в многослойных средах? Вряд ли. Представляется целесообразным подготовить обучающегося к постановке такого рода задач и поиска, подходящего для этого математического пакета. К примеру, среда Mathlab, при наличии умений у обучаемого с ней работать, позволит не только провести расчеты, но и отлично визуализировать, создавая необходимые диаграммы и графики. Причем что важно, варьируя свойства среды, начальные и граничные условия, можно просмотреть вызываемые этими параметрами изменения в расчетах и графиках. Этот МП можно использовать при обсуждении подобных вопросов, касаемых материала курса ПАХТ, обращая при этом внимание не на обычно возникающие математические затруднения при поиске аналитического решения и принимаемы упрощения, а на влияние параметров на результаты решения. Это позволит будущему выпускнику формировать «чувство» результата, т.е. «ощущать» возможное поведение системы при, например, случайных изменениях параметров. Дидактические возможности современных информационных технологий разнообразны [1].

Еще больше возможностей появляется при использовании специализированных МП. Работа с МП Aspen plus, ChemCad на профессиональном уровне может быть достигнута при их освоении, обычно включаемого в образовательные программы УГСН 18.00.00 курса по компьютерному моделированию химико-технологических процессов, так как для этого требуется значительное время. Но возможности этих МП - решение широкого круга инженерных задач, наличие справочных материалов, в том числе физико-химических свойств многих соединений, использование надежных алгоритмов, обеспечивающих получение точных результатов расчетов, совместимость с другими программами - вызывают желание применять их при реализации других дисциплин, в том числе и курса ПАХТ, хотя бы на начальном уровне. «Притягательной силой» является возможность проведения параметрического анализа различных процессов, данные для которых имеются в библиотеках, входящих в состав системы.

Предпочтительным, по нашему мнению, является ChemCad. Он имеет простой и интуитивный интерфейс, который делает его подходящим для новичков в инженерии процессов. Его графический редактор позволяет легко создавать схемы процессов. ChemCad представляет собой мощный инструмент для моделирования различных технологических процессов, таких как ректификация, абсорбция, дистилляция и др. Использование этого МП позволяет студентам получить практические навыки работы с реальными промышленными данными, что значительно повышает уровень их профессиональной компетентности [2, 3].

Одним из основных преимуществ ChemCad является возможность проведения виртуальных экспериментов, что особенно актуально в условиях ограниченного доступа к реальному оборудованию. Студенты могут исследовать влияние различных параметров процесса на конечный результат, проводить оптимизацию установок и анализировать экономическую эффективность предлагаемых решений.

Кроме того, программа помогает визуализировать сложные процессы, что способствует лучшему пониманию теоретического материала. Интерактивный характер ChemCad делает обучение более увлекательным и мотивирующим для студентов.

Использование математических пакетов при освоении материала разных дисциплин, может побуждать обучающегося на выполнение сложных расчетов и снижать психологический барьер в использовании математических методов при решении различных задач.

Во-вторых, как контролировать процесс обучения, и как его корректировать при необходимости? Известны общие подходы, связанные с использованием информационных технологий. Но главное все же здесь — это настроить обучающегося на освоение материала данной дисциплины. В условиях студентоцентрированного образовательного процесса необходимы умения работать с каждым студентом. Поэтому важнейшей задачей организации образовательного процесса является создание условий для систематической работы обучаемого, в том числе, с использованием возможностей электронного обучения и дистанционных образовательных технологий.

В-третьих, какова роль научно-педагогического работника?

«Цифровизация» образования продвигается быстрыми шагами, тесня классическое образование. Этому способствуют возможности электронного обучения и применение дистанционных

образовательных технологий, которые теснят традиционные формы образовательной деятельности. Наличие электронных библиотек позволяет быстро находить необходимую (правда, иногда противоречивую) для расчетов научно-техническую информацию. Размещенные в Интернет многочисленные лекции, презентации, видеоматериалы, касающиеся материала курса, нередко в открытом доступе, создают впечатление абсолютной доступности. Так ли это на самом деле или здесь есть какие-то ограничения. Любая система может давать сбой и нет уверенности в том, что это не произойдет именно тогда, когда она более всего нужна. Материалы, размещенные на сайтах, не всегда корректны, имеются ошибки, которые может увидеть читатель, имеющий знания. Однако, главное не это. Главное – это личность преподавателя, который находится вместе со студентами в вузовской аудитории. Его речь, логика изложения, аргументация, комментарии, т.е. то, чего не найти ни в учебнике, ни на сайте. Да, его можно видеть на экране монитора, но студент не будет чувствовать своего присутствия в аудитории, содействия в достижении успешного освоения дисциплины и получения качественного образования. «Механическое» запоминание информации не углубляет знания; для этого необходимо, чтобы полученная информация была осмысленной и понятной, чтобы стать полезной.

Роль преподавателя по-прежнему высока, когда проводится беседа его со студентом на коллоквиуме, при обсуждении результатов научно-исследовательской работы, результатов лабораторных работ. Машина не может мыслить, но она может «помочь» в поиске нужных источников информации, размещенных в сети, заметно сократив на это временные затраты. Но доля научных статей, тезисов, рефератов опубликованных в доинтернетовские времена, оцифрованных, размещенных в настоящее время в сети, к которым имеется доступ, невелика. И здесь без помощи научно-педагогического работника, многие годы ведущего научные исследования и хорошо знакомого с публикациями, не обойтись.

В принципе можно создать «умную» программу-робот, которая будет выдавать обучающемуся необходимую информацию, подлежащую запоминанию, проводить тестирование и при наличии не усвоенных ее частей возвращать в нужную точку для повторного прочтения или «ставить» наводящие вопросы, демонстрировать упражнения, показывать примеры и так далее до тех пор, пока не будет достигнуто усвоение требуемой информации на заданном уровне. Скорее всего, обучающийся не дойдет до конца программы. К тому же, такая обучающая программа будет очень затратной и на ее создание потребуется много времени. Учитывая то множество дисциплин, которые сейчас входят в многочисленные образовательные программы, для реализации такого подхода к организации образовательного процесса у разработчиков может не хватить ни сил, ни средств, ни времени. Кроме того, «умная» обучающая программа может помочь обучающемуся усвоить необходимую информацию, но она не сможет научить его мыслить. А высококвалифицированный научно-педагогический работник при непосредственном взаимодействии с обучающимся может помочь.

В данном сообщении авторы коснулись лишь некоторых проблем, существующих в системе высшего образования. Многие из них выходят за рамки организации и осуществления образовательного процесса по курсу ПАХТ, но есть и такие, в частности, междисциплинарный подход в реализации дисциплин по-прежнему заслуживающий внимания.

Список литературы

1. Дидактические возможности современных информационных технологий в подготовке специалиста-химика / Е. В. Береснева [и др.] // Интеграция образования. 2018. Т. 22, № 1. С. 177–192. DOI: 10.15507/1991-9468.090.022.201801.177-192.
2. Математическое моделирование химико-технологических систем с использованием программы ChemCad: Учебно-методическое пособие / Казан. гос. технол. ун-т. Сост.: Н.Н. Зиятдинов, Т.В. Лаптева, Д.А. Рыжов. – Казань, 2008. – 160 с.
3. Компьютерное моделирование химико-технологических процессов в программе CHEMCAD: практическое руководство для технологов и проектировщиков: учебное пособие для вузов / О.В. Перерва, Т.Н. Гартман, А.В. Панкрушина, Ф.С. Советин. – Санкт-Петербург: Лань, 2024. -184 с.

УДК 371.3, 66.02

Климкин М.А., Ломакин С.П., Просочкина Т.Р., Табаев А.М.

Применение социальных сетей для популяризации дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии» на примере группы из социальной сети «ВКонтакте»: «ПАХТ в массы»

Климкин Максим Александрович - к.х.н., доцент кафедры; maskim76@list.ru

Ломакин Сергей Петрович – к.т.н., доцент кафедры;

Просочкина Татьяна Рудольфовна - д.х.н., заведующий кафедрой;

Табаев Арсен Маратович - студент;

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,

Россия, ПФО, Республика Башкортостан, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1,

В современном мире социальные сети стали неотъемлемой частью нашей повседневной жизни, оказывая значительное влияние на различные сферы деятельности. Образование не является исключением. Применение социальных сетей в образовательном процессе открывает новые возможности для популяризации и углубленного изучения предметов, таких как "Процессы и аппараты химической технологии". В данном докладе мы рассматриваем потенциал и преимущества использования группы «ПАХТ в массы» из социальной сети «ВКонтакте» в образовательном процессе.

Ключевые слова: Процессы и аппараты химической технологии, социальная сеть

The use of social networks to popularize the discipline "Processes and devices of chemical technology" using the example of a group from the VKontakte social network "PDCT to the masses"

Klimkin M.A., Lomakin S.P., Prosochkina T.R., Tabaev A.M.

Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Republic of Bashkortostan, Russian Federation

In today's world, social media has become an integral part of our daily lives, having a significant impact on various fields of activity. Education is no exception. The use of social networks in the educational process opens up new opportunities for popularization and in-depth study of such disciplines as "Processes and devices of chemical technology". In this report, we will look at the potential and advantages of using the "PDCT to the masses" group of the VKontakte social network in the educational process.

Keyword: Processes and devices of chemical technology, social network

Введение

Современные технологии и цифровизация образования открывают новые возможности для популяризации научных и учебных дисциплин [1]. Социальные сети, как один из наиболее популярных инструментов коммуникации, могут стать эффективным средством для привлечения внимания студентов и заинтересованных лиц к сложным техническим дисциплинам, таким как «Процессы и аппараты химической технологии». В данной статье мы рассказываем об опыте использования и ведения образовательной группы в социальной сети, направленной на популяризацию данной дисциплины.

Дисциплина «Процессы и аппараты химической технологии» является одной из ключевых в подготовке инженеров-химиков. Однако её сложность и специфика часто вызывают у студентов трудности в освоении материала. В период проведения большого количества дистанционных занятий (по эпидемиологическим показаниям) была выявлена проблема, связанная с разбором практических и лабораторных занятий, ввиду недостаточной наглядности проводимых занятий. Кроме того, обнаружено, что подготовленные видеоматериалы активно и многократно используются студентами для подготовки к занятиям. Поэтому, возникла идея создания накопительного ресурса, на котором можно аккумулировать различные тематические материалы по предмету, обеспечив широкую доступность для учащихся.

Социальные сети, благодаря своей доступности и интерактивности, могут стать инструментом для повышения мотивации и интереса к изучению дисциплины. Кроме того, они позволяют расширить аудиторию и привлечь внимание к важности химической технологии в современном мире. В качестве основной площадки рассматривалась уже существовавшая группа в социальной сети «ВКонтакте» - https://vk.com/pakht_eto_kruto, с названием «ПАХТ в массы». Данная социальная группа была создана в 2020 году студентами, изучающими данную дисциплину, для обмена

информацией по практическим и лабораторным занятиям. Группа первоначально предназначалась для узкого круга студентов, но быстро набрала популярность и достигла численности до 300 человек.

В начале 2024 года состоялся первый перезапуск группы, где в качестве основного контента рассматривалось решение задач, так как именно с освоением этого материала у студентов часто возникают проблемы. Пропуск занятия или непонимание даже незначительного фрагмента может сформировать у студента непонимание или неприятие предмета в целом, что негативно сказывается на подготовке обучающихся. А возможность повторного просмотра в удобное время, с возможностью перерыва в объяснении решения задачи, может облегчить процесс усвоения материала. Однако, количества подготовленного материала оказалось недостаточно для длительного наполнения группы, к тому негативным фактором сказалось отсутствие обратной связи от подписчиков и непонимание авторами нужности и актуальности материала. Тем не менее, группа набирала подписчиков, что видно из рисунка 1.

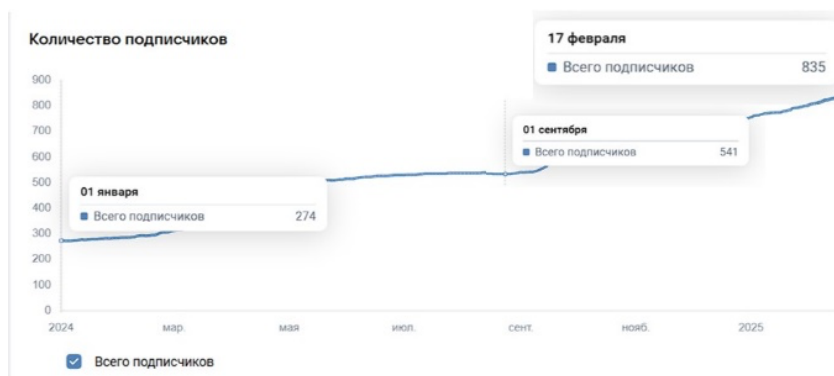


Рисунок 1 - Количество участников

Второй перезапуск группы состоялся в сентябре 2024 года и был связан с вовлечением инициативного студента, обучающегося на бакалавриате. В результате была разработана новая концепция, включающая как изменения визуального характера, так и связанные с подачей материала — узнаваемая графическая композиция, приведенная на рисунке 2: логотип и оффер.



Рисунок 2 - Обложка группы

Ведение обучающе-справочной группы, касающейся сложной технической дисциплины, такой как «ПАХТ», является достаточно сложным процессом, требующим комплексного подхода и специфических навыков. Поэтому нами было реализовано два подхода: 1 — теоретико-обучающий, со стороны преподавательского состава, 2 — практико-юмористический, со стороны студентов. Очевидно, что любой проект должен иметь так называемое «ядро» - в нашем случае, это тематика. Процессы и аппараты химической технологии является очень обширной темой, затрагивающей сразу несколько научных областей: химию, физику, технологию, механику, математику и в некоторой степени информатику. Каждая из них сама по себе является огромной самодостаточной сферой с международными сообществами и многолетней историей, а их пересечения создают еще больше «информационного поля». Однако научное «ядро» имеет существенный недостаток: оно содержит не очень узконаправленную информацию, что делает его менее интересным для широкого круга подписчиков. Как показывают наблюдения, группы такого типа, созданные для студентов, имеют

функцию скорее хранилища, чем полноценного сообщества. Мы предлагаем решить эту проблему следующим образом: «завернуть» сложную техническую тематику в юмористическую «обертку». То есть, информация подается в юмористическом и научно-популярном стиле. Выдуманные цитаты рабочих, истории на сменах, доброе высмеивание недостатков химико-технологических процессов, истории из студенческих лет. Соответственно, были проанализированы множество групп в различных социальных сетях, и выявлены интересные приемы и тенденции. Результатом этой работы стала модернизация группы и появление сообщества, с индивидуальными особенностями, обладающих уникальным составом контента, в рамках химико-технологической тематике. Группа в таком формате могла быть направлена по 2 направлениям: структуризация знаний и популяризация дисциплины. Нами была выбрана стратегия популяризации предмета в целом и смежных отраслей, что привело к росту количества просмотра постов. Из рисунка 3 видно, что произошло увеличение просмотра постов от 20 до 45 раз.

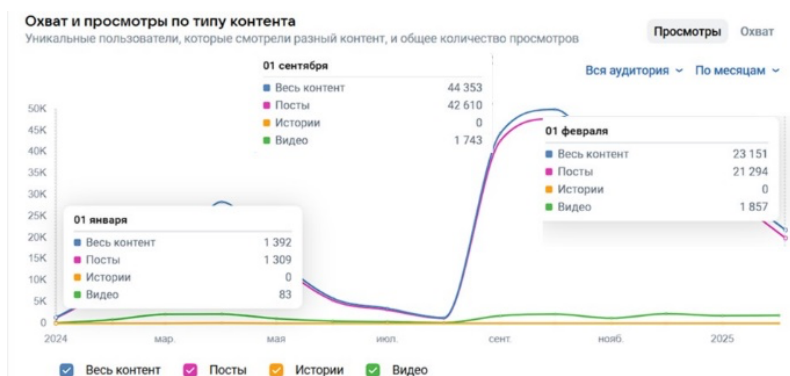


Рисунок 3 - Количество просмотров по месяцам

Такой подход позволил получить важный элемент ведения сообщества – обратную связь. С ее помощью можно не только корректировать границы допустимого юмора, но и дать возможность подписчикам участвовать в жизни группы, комментировать посты и предлагать свои идеи через инструмент «предложить запись». В совокупности с количеством репостов, лайков и применением хештегов (#ПАХТ #процессыиаппараты #ПАХТэтокруто #новостиПАХТ #помощьстуденту #химическая технология #USPTU #УГНТУ #Нефтепереработка #Технологии #ИнтересныеФакты #ВакуумнаяПерегонка) это работает как «сарафанное радио», позволяя материалам попадать в различные новостные ленты.

Одним из главных плюсов, безусловно, является постепенное развитие группы и коммуникация с различными участниками информационного поля. Для нашего сообщества это стало совместной коллаборацией с компанией «РТСИМ» <https://vk.com/rtsim>, которая является разработчиком компьютерных тренажеров для обучения специалистов предприятий и студентов для нефтегазового сектора – российского компьютерного тренажера под торговой маркой RTsim. При информационной поддержке компании «РТСИМ» были проведены стримы (записи выложены на различных ресурсах). Один из них был посвящен свойствам различных технологических сред: как газообразных, так и жидких; второй стрим – устройствам для транспортировки жидкостей – насосам: рассмотрены основные типы насосов и их конструктивные особенности. По результатам выяснилось, что обе темы являются весьма востребованными – об этом говорит непосредственный рост подписчиков данного сообщества. Планируется расширять сотрудничество и проводить стримы, посвященные различным разделам предмета «Процессы и аппараты химической технологии».

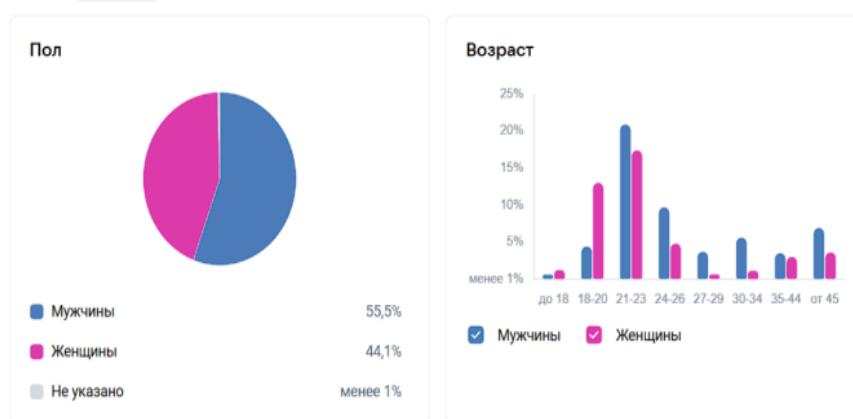


Рисунок 4 - Статистика участников сообщества по возрасту и полу

Несмотря на то, что группа первоначально посвящена развитию именно дисциплины «ПАХТ», в настоящее время в сообществе расширяется ассортимент материалов, затрагивающих такие области знаний, как общая химическая технология, газохимия, нефтепереработка. Таким образом, материалы, которые мы выкладываем, становятся интересны широкому кругу обучающихся и специалистов.

Об этом говорит статистика участников нашего сообщества, приведенная на рисунке 4, где видно, что возраст основных наших участников колеблется, как в интервале 18-26 лет (причем тематика интересна, как мужчинам, так и женщинам), так и в том числе, лицам, старше 30 лет, что говорит о интересе к группе, как профильных специалистов, так и людей, интересующихся сложными и междисциплинарными областями знаний. Следует отметить, что в сообществе состоят как обучающиеся ССУЗов и ВУЗов, так и преподаватели, и люди, работающие в химической и смежных отраслях.

Заключение

Таким образом можно сделать следующие выводы о преимуществах применения социальных сетей в образовательном процессе и популяризации предмета «Процессы и аппараты химической технологии»

1. **Доступность информации:** Социальные сети позволяют учащимся и преподавателям быстро и легко делиться учебными материалами, такими как лекции, презентации, статьи и видеоуроки. Это обеспечивает доступ к большому количеству ресурсов, которые можно использовать для углубленного изучения предмета. Например, группы и страницы в социальных сетях могут служить центральными точками для хранения и распространения учебных материалов, облегчая их поиск и использование [2].

2. **Интерактивность:** Социальные сети предоставляют платформу для активного взаимодействия между учениками и преподавателями. Учащиеся могут задавать вопросы, оставлять комментарии и делиться своими мыслями по поводу учебных материалов. Это способствует созданию диалога и обмену знаниями, что помогает глубже понять изучаемые темы и получить ответы на вопросы в режиме реального времени. Взаимодействие между учениками также способствует развитию навыков критического мышления и аналитических способностей.

3. **Сетевое обучение:** Социальные сети способствуют созданию учебных сообществ, в которых учащиеся могут взаимодействовать друг с другом и с преподавателями, делиться знаниями и опытом, а также работать над совместными проектами. Это создает благоприятные условия для сотрудничества и коллективного обучения, что позволяет учащимся лучше усваивать материал и развивать навыки командной работы. Кроме того, сетевое обучение позволяет ученикам из разных регионов и стран обмениваться знаниями и опытом, что делает образовательный процесс более глобальным и разнообразным.

4. **Визуализация данных:** Социальные сети предоставляют возможность использования различных форматов контента, таких как изображения, инфографика, видеоролики и анимации, которые помогают учащимся лучше понимать и усваивать сложные концепции. Визуальные материалы могут значительно облегчить изучение сложных химических процессов и аппаратов, делая информацию более наглядной и доступной.

5. **Мотивация и вовлеченность:** Социальные сети могут быть мощным инструментом для повышения мотивации и вовлеченности учащихся в учебный процесс. Например, проведение

конкурсов, челленджей и викторин по теме "Процессы и аппараты химической технологии" может стимулировать интерес учащихся и сделать учебный процесс более увлекательным. Кроме того, публикация достижений и успехов учащихся в социальных сетях может служить дополнительным стимулом для их мотивации и стремления к новым достижениям [3].

6. Привлечение студентов из других вузов и смежных специальностей: Социальные сети предоставляют уникальную возможность для привлечения студентов из других университетов и смежных специальностей. Создание междисциплинарных групп и сообществ позволяет обмениваться знаниями и опытом, а также обсуждать различные аспекты химической технологии с широкой аудиторией. Это способствует развитию междисциплинарного подхода и интеграции знаний, что может привести к новым открытиям и инновациям. Например, сотрудничество студентов химических, биологических, инженерных и IT-специальностей может привести к разработке новых технологий и методов в области химической промышленности.

7. Применение социальных сетей в образовательном процессе предоставляет уникальные возможности для популяризации и углубленного изучения предмета "Процессы и аппараты химической технологии". Доступность информации, интерактивность, сетевое обучение, визуализация данных, а также повышение мотивации и вовлеченности учащихся способствуют более глубокому пониманию и освоению материала. Применение различных методов, таких как создание образовательных групп, проведение вебинаров и конкурсов, использование хэштегов и получение обратной связи, позволит значительно повысить интерес и мотивацию учащихся. Важно понимать, что социальные сети являются мощным инструментом, который, при правильном использовании, может значительно улучшить качество образования и способствовать развитию профессиональных навыков учащихся.

Список литературы

1. Иванов И.И. Цифровизация образования: новые возможности и вызовы. – М.: Издательство «Наука», 2021.
2. Петрова А.А. Социальные сети в образовании: теория и практика. – СПб.: Издательство «Питер», 2020.
3. Smith J. Social Media in Education: Engaging the Digital Generation. – London: Routledge, 2019.

УДК 66.011

Клинов А.В., Дьяконов С.Г., Дьяконов Г.С., Фарахов М.И.

Научная и педагогическая школа процессов и аппаратов химической технологии в Казани. История, достижения, современное состояние

Клинов Алেকсандр Вячеславович – д.т.н., профессор, зав каф. ПАХТ, alklin@kstu.ru;

Дьяконов С.Г. – д.т.н., профессор, каф. ПАХТ

ФГБОУ ВО «КНИТУ», Россия, Казань, 420015, ул. Карла Маркса, 68.

С.Г., Дьяконов – д.т.н., профессор, germansdyakonov@gmail.com

Фарахов М.И. – д.т.н., директор ООО «ИВЦ «Инжехим», info@ingehim.ru

В тезисах представлена история и современное состояние, научной и педагогической школы по процессам и аппаратам химической технологии в Казани. Отмечается особенность современных научных направлений ориентированная на концепцию проектирования промышленных процессов и технологий с использованием минимального количества эмпирической информации. В идеальном варианте это методология проектирования, построенная на теоретическом описании инвариантном к масштабу аппарата, содержащая методы предсказания физико-химических свойств рабочих сред обладающие высокой степенью достоверности. Обсуждаются современные тенденции преподавания дисциплины процессы и аппараты химической технологии.

Ключевые слова: наука и дисциплина процессы и аппараты химической технологии, методы вычислительной гидродинамики, молекулярное моделирование.

Klinov A.V.¹, Dyakonov S.G.¹, Dyakonov G.S., Farakhov M.I.²

Scientific and pedagogical school of processes and apparatus of chemical technology in Kazan.

History, achievements, current state

¹ KNRTU, Russia, Kazan, 420015, Karl Marx St., 68

² ООО «ICC «Inzhekhim», info@ingehim.ru

The abstract presents the history and current state of the scientific and pedagogical school of processes and apparatuses of chemical engineering in Kazan. The peculiarity of modern scientific directions focused on the concept of designing industrial processes and technologies using a minimum amount of empirical information is noted. In the ideal version, this is a design methodology built on a theoretical description invariant to the scale of the apparatus, containing methods for predicting the physicochemical properties of working environments with a high degree of reliability. Modern trends in teaching the discipline of processes and apparatuses of chemical engineering are discussed.

Keywords: science and discipline of processes and apparatuses of chemical engineering, methods of computational fluid dynamics, molecular modeling.

Историю возникновения научной и педагогической школы процессов и аппаратов химической технологии в Казани можно проследить с конца XIX века. Определяющими здесь были два фактора: наличие в Казани и близлежащих районах (г. Менделеевск) химических промышленных предприятий и известной школы химиков классического университета (Зинин, Бутлеров, Зайцев, Арбузов). Плодотворное взаимодействие химиков с промышленными предприятиями для решения технологических задач и подготовки квалифицированных технических кадров стало основой для открытия в 1897 году Казанского промышленного училища. Училище давало средне-специальное образование и выпускало механиков, химиков-технологов и строителей. Приемником этого училища впоследствии стал Казанский химико-технологический институт (КХТИ) в настоящее время Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ).

Научные направления непосредственно представляющие науку о процессах и аппаратах химической технологии зародились в КХТИ на двух кафедрах в начале 30-х годов прошлого столетия. Это были кафедра теоретических основ теплотехники (ТОТ) и соответственно кафедра процессов и аппаратов химической технологии (ПАХТ). Позднее еще была организована кафедра машин и аппаратов химических производств, тематика научных исследований на которой так же соответствовала науке о ПАХТ. До сих пор основу диссертационного совета по ПАХТ в казанском технологическом университете представляет профессура этих трех кафедр.

Первым заведующим каф. ТОТ Германом Константиновичем Дьяконовым было инициировано научное направление по моделированию процессов физико-химических превращений [1-3], где впервые химическая кинетика в реальных средах рассматривалась на основе принципа подобия. Данное направление было продолжено его учеником профессором Айтуганом Гарифовичем

Усмановым в области физической кинетики, и оно продемонстрировало свою эффективность на огромном числе реальных процессов в реальных средах. Также широко известна была теплофизическая научная школа каф. ТОТ, результаты экспериментальных исследований которой вошли во многие справочники по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Например, представитель этой школы проф. Тарзиманов А.И., был соавтором нескольких справочников вместе с Н.Б. Варгафтиком [4]. В настоящее время на каф. ТОТ активно развивается научное направление, связанное с фундаментальными и прикладными исследованиями в области сверхкритического флюидного состояния вещества и сверхкритических флюидных промышленных технологий.

На кафедре ПАХТ КНИТУ в разное время занимались научными исследованиями и разработками в области гидродинамики, тепло и массообмена процессов химической технологии. В период с 1941 по 1944 г.г. на кафедре работал профессор, доктор технических наук, крупный ученый, педагог и специалист по химическому машиностроению К.Ф. Павлов, являющийся соавтором учебного пособия "Примеры и задачи по курсу ПАХТ", по которому обучаются и нынешние студенты.

В 1985г. зав. каф. ПАХТ Сергеем Германовичем Дьяконовым было высказана идея о возможном представлении аппарата в виде системы, обладающей иерархической структурой элементарных явлений, инвариантных к масштабу аппарата. Это привело к созданию методологии сопряженного физического и математического моделирования [5], которое применялось для описания, проектирования и реконструкции промышленных аппаратов.

С 1997 года кафедру возглавил д.х.н., профессор Дьяконов Г.С. В это время в связи с бурным развитием вычислительной техники на кафедре активно развиваются методы математического моделирования процессов переноса и химического превращения в аппаратах химической технологии.

Особенность научных направлений развиваемых с конца 80-х годов прошлого столетия на кафедре ПАХТ КНИТУ, заключалась в развитии в концепции построения промышленных процессов и технологий с минимальным привлечением эмпирической информации. В идеальном варианте это методология проектирования, построенная на теоретическом описании инвариантном к масштабу аппарата, содержащая методы предсказания физико-химических свойств рабочих сред обладающие высокой степенью достоверности. В широком смысле это методы проектирования промышленных технологий «от молекулы». Очевидно, что такая методология проектирования должна строиться на фундаментальных основах процессов, протекающих в промышленных аппаратах в виде законов сохранения, термодинамики, явлений переноса субстанций и химических превращений. Сформулированные на этой основе уравнения, описывающие поля скоростей, концентраций и температур в рабочих средах оказались нелинейными дифференциальными уравнениями с частными производными второго порядка, решение которых представляет сложную математическую задачу. Поэтому исторически, развитие науки ПАХТ пошло по пути создания приближенных методов расчета, в основе которых было либо сокращение исчерпывающего описания (математическое моделирование), либо применение теории подобия (физической моделирование). Успех этих методов определялся в первую очередь тем, что при решении инженерных задач часто не требуется знать детальную картину происходящего в каждой точке аппарата. Достаточно адекватно определять характеристики потоков на выходе из аппарата в зависимости от входных величин и геометрии аппарата. Это можно сделать с помощью законов сохранения массы, энергии и импульса в интегральной форме, зная количество субстанций, перенесенных из одной фазы в другую. Для определения последних применяются уравнения межфазного переноса субстанций. Несмотря на высокую эффективность методов математического и физического моделирования, которую они показали на протяжении многих лет их применения при решении различных задач, связанных с расчетом, проектированием, оптимизацией ПАХТ, у них есть и существенные недостатки. К главным недостаткам относятся зависимость от большого объема эмпирической информации и связь с масштабом или конструкцией аппарата.

В настоящее время в связи с развитием вычислительной техники появилась возможность получения численного решения системы дифференциальных уравнений, представляющих исчерпывающее описание процессов химической технологии. В литературе такой подход получил название методов вычислительной гидродинамики ВГД (в английской транскрипции CFD). Очевидно, что в отличие от приближенных моделей методы ВГД обладают предсказательностью, так как требуют задания только условий однозначности и свойств среды. Успешные примеры

использования методов ВГД для решения инженерных задач химической технологии, некоторые из которых будут здесь рассмотрены, позволяют надеяться, что в перспективе они станут основными методами решения задач в области ПАХТ.

Еще одним ограничением традиционных методов решения задач ПАХТ является концепция сплошной среды, которая ограничивает масштаб элементарного объема среды: он должен быть термодинамической системой, т.е. в нем должно находиться большое количество молекул, ионов и т.д. В этом случае все физико-химические свойства среды являются параметрами в дифференциальных уравнениях для полей скоростей, температур и концентраций, которые в свою очередь могут зависеть от этих полей. Очевидно, что, оставаясь в рамках модели сплошной среды, невозможно получить строгие выражения для расчета различных физико-химических свойств рабочих агентов. В то же время, очевидно, что все протекающие изменения рабочей среды в аппарате и в конечном итоге свойства получаемого продукта определяются поведением большого числа молекул и атомов, составляющих рассматриваемую систему. Тогда в качестве фундаментальных основ математического описания процессов химической технологии могут выступать законы статистической и квантовой механики, основной задачей которых является установление связи между поведением отдельных частиц, рассматриваемой системы и макросвойствами, характеризующими систему как целое. Перспективность использования этих основ для решения задач ПАХТ связана с тем, что в этом случае можно получать замкнутое математическое описание, для которого исходными данными являются потенциалы межмолекулярного взаимодействия компонентов рассматриваемой системы, которые зависят только от атомного строения молекулы вещества и не зависят от параметров состояния.

Часто методы ВГД и методы статистической механики называют методами численного эксперимента, позиционируя их как альтернативу физическому. Конечно, нельзя говорить о возможной полной замене физического эксперимента численным, тем не менее, уже в настоящее время использование методов численного эксперимента при решении инженерных задач ПАХТ позволяет существенно снизить объем экспериментальных исследований без потери точности получаемых результатов.

В настоящее время научная работа на кафедре ПАХТ КНИТУ ведется по следующим направлениям:

1. Экспериментальное исследование и моделирование гидродинамики многофазных потоков. Для проведения исследований используются: лазерная установка «ПОЛИС», пакет вычислительной гидродинамики ANSYS FLUENT.

2. Экспериментальное исследование и моделирование процессов разделения жидких и газовых смесей. Для проведения исследований используются: экспериментальные и пилотные установки ректификации, мембранного разделения (первапорации), адсорбции, моделирующие программные комплексы Aspen HYSYS, ChemCad, собственные программы.

3. Экспериментальные исследования и моделирование физ.-хим. свойств и условий фазового равновесия в одно и многокомпонентных системах. Для проведения исследований используются: аналитическое оборудование, экспериментальные установки, методы молекулярного моделирования (молекулярная динамика и Монте-Карло) и полуэмпирические модели [6].

Как учебная дисциплина предмет ПАХТ имеет инженерную направленность и охватывает широкий круг процессов. Совершенно справедливо Ю.И. Дытнерский в предисловии к своему учебнику по ПАХТ вышедшему в 1995г. отмечал, что нужно «...помочь студенту подойти к рассмотрению каждого конкретного процесса с общетеоретических и общинженерных позиций.» Поэтому материал этого учебника начинается с главы, в которой формулируются общие теоретические основы процессов химической технологии. Развивая, в том числе и эту методологию сотрудниками каф. ПАХТ КНИТУ был написан учебник, вышедший в издательстве «Лань» в 2022 году. Отличительной особенностью изложения материала в учебнике является максимально возможное использование аналогии переноса различных субстанций в широком смысле как сходство между явлениями, а также прием познания. Этим объясняется введение таких понятий, как импульсоотдача и импульсопередача, гидродинамический критерий Нуссельта, что позволило в более простом виде представить гидродинамическую аналогию массо- и теплоотдачи. Существенное внимание уделено условиям проявления аналогии в узком смысле как тождественность математического описания переноса различных субстанций и возможностям ее практического применения. В отличие от традиционно постулирующихся уравнений массо- и теплоотдачи они, а также уравнение импульсоотдачи выводятся из решения уравнений переноса

субстанций в пограничных слоях, что позволяет получить теоретические выражения для соответствующих кинетических коэффициентов, а затем и упрощенных моделей. В качестве отдельного механизма переноса субстанций выделен турбулентный, который включен в теоретическое описание процессов переноса, что позволяет получить решения применимые для практически важных случаев. При записи выражений для потоков субстанций большое внимание уделяется правильности выбора системы отсчета и определения с учетом этого коэффициентов переноса. Рассмотрение типовых процессов и аппаратов химической технологии акцентировано на сути протекающих процессов, принципе устройства и работы соответствующих аппаратов, методиках их расчета, а также факторах, позволяющих проводить их оптимизацию.

Успешное освоение инженерных дисциплин, к которым относится предмет «Процессы и аппараты химической технологии», требует обязательного выполнения определенного объема лабораторных работ. Для этого необходима физическая лаборатория, в которой студенты проводят эксперименты, изучают принципы работы аппаратов, их конструкцию, измерительные приборы, суть процессов, протекающих в них. Традиционно лабораторный практикум проводится на физических моделях аппаратов с целью формирования понимания основ и закономерностей протекания процессов, ознакомления с конструкциями промышленных аппаратов их элементов и машин, а так же измерительными приборами. Работа в учебных лабораториях формирует у студентов компетенции необходимые в дальнейшей профессиональной инженерной деятельности. С развитием цифровых технологий в научной и образовательной среде возникли дискуссии о их месте в лабораторном практикуме при изучении инженерных дисциплин, в том числе возможной полной замене физической лаборатории виртуальной. Последнее на первый взгляд давало очевидные преимущества главные из которых это существенное уменьшение затрат на создание и обслуживание лабораторий, безопасность, возможность математического моделирования и использование их в режиме онлайн обучения. Однако после накопления некоторого опыта использования виртуальных лабораторий в учебном процессе, как в иностранных, так и отечественных вузах, и анализа полученных результатов, выяснилось, что не для всех специальностей возможна замена физических лабораторий виртуальными без потери качества приобретаемых компетенций. К таким специальности относятся инженерные, медицинские и некоторые др.

Компромисс может быть достигнут на основе понимания основных новых возможностей, которые несут цифровые технологии, среди которых: новый уровень визуализации процессов, явлений, конструкций и т.д., вычислительные мощности, возможность хранения и быстрого доступа к огромному количеству информации. Эти возможности необходимо использовать не вместо, а вместе с физическими моделями установок и аппаратов. Поэтому на кафедре ПАХТ КНИТУ были созданы физические лабораторные установки с цифровой составляющей [7,8], позволяющей «заглянуть» в суть изучаемого процесса. Если в рамках физического эксперимента измерению поддается конечное число параметров, то при использовании цифровых технологий в совокупности с нейросетевым моделированием студентам становится доступна информация о процессе, которую проблематично измерить и увидеть на реальных физических установках. Используя цифровые технологии, студенты усваивают учебный материал быстрее и на более высоком качественном уровне.

Список литературы

1. Дьяконов Г.К. «Докл. АН СССР», 1943, т.39, в. 4.
2. Дьяконов Г.К. «Изв. АН СССР, ОТН», 1944, № 7 - 8.
3. Дьяконов Г.К. «Докл. АН СССР», 1947, т.57, в. 7.
4. Варгафтик Н.Б., Филиппов Л.П., Тарзиманов А.А., Тоцкий Е.Е. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов 1990. 352 с.
5. Дьяконов С.Г. «Докл. АН СССР», 1985, т. 282, № 5.
6. Klamt A., Eckert F, COSMO-RS: a novel and efficient method for the a priori prediction of thermophysical data of liquids//Fluid Phase Equilibria, V. 172, I. 1, 2000, P.s 43-72.
7. Анашкин И.П., Мухаметзянова А.Г., Петров А.В., Донин К.С., Цифровая модернизация лабораторной установки по изучению структуры потока в аппаратах//Вестник Технологического университета. 2024. Т. 27. № 9. С. 90-94.
8. Анашкин И.П., Методика экспериментального изучения процесса теплообмена с использованием имитационных моделей в реальном времени//Вестник Технологического университета. 2024. Т. 27. № 9. С. 99-103.

УДК 54.05, 66.02.

Кожемова К.Р., Алтуева А.М., Бесланеева З.Л., Виндижева А.С., Кушхова С.В.,
Зашакуева А.А.

Интеграция принципов синтеза в обучение предмету "Процессы и аппараты химической технологии"

Кожемова Карина Руслановна - к.х.н., доцент кафедры, kozhemova88@mail.ru.

Алтуева Альбина Мухамедовна - к.т.н., старший преподаватель кафедры;

Бесланеева Зера Лионовна – к.т.н., доцент кафедры;

Виндижева Амина Суадиновна - к.т.н., доцент кафедры;

Кушхова Сатаней Владимировна – магистр;

Зашакуева Амина Аслановна – магистр;

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова», Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, 360004, ул. Чернышевского, 173.

В тезисе анализируются подходы к синтезу мономеров и полимеров, содержащих пиррольное кольцо, как эффективный инструмент для укрепления практических компетенций студентов в рамках изучения дисциплины "Процессы и аппараты химической технологии".

Ключевые слова: реактор, диэтинилсодержащие мономеры, актуальные технологии, пленкообразующий полифениленэфирпиррол.

Integration of the principles of synthesis into teaching the subject "Processes and apparatus of chemical technology"

Kozhemova K.R., Altueva A.M., Beslaneeva Z.L., Vindizheva A.S., Kushkhova S.V., Zashakueva A.A.,

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov", Nalchik, Russian Federation.

The thesis analyzes approaches to the synthesis of monomers and polymers containing a pyrrole ring as an effective tool for strengthening the practical competencies of students in the context of studying the discipline "Processes and apparatuses of chemical technology".

Keywords: reactor, diethynyl-containing monomers, current technologies, film-forming polyphenylene etherpyrrole.

Введение

Преподавание дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии» является важной частью образовательного процесса в области химического инжиниринга. Этот курс охватывает широкий спектр вопросов, связанных с проектировкой, эксплуатацией и применением различных технологических процессов в области химической индустрии. По этой причине важное значение имеют методы и подходы к обучению, а также учебные материалы, которые используются в процессе. Одним из основных компонентов преподавания этого курса является развитие у студентов глубокого понимания процессов, происходящих в химических реакторах и аппаратах. Эти знания становятся необходимым условием для их успешной профессиональной активности в будущем.

В условиях динамично развивающейся промышленности актуальность повышения качества выпускаемой продукции становится неременным условием успеха. Это предполагает соответствие не только растущим запросам потребителей, но и строгим нормативам и стандартам. В рамках такой эволюционной ситуации особенно значимо внедрение в образовательный процесс современных технологий и оборудования для подготовки химических инженеров, способных эффективно справляться с вызовами индустрии. Основная задача преподавания курса «Процессы и аппараты химической технологии» сегодня заключается не только в обеспечении теоретических знаний о реакторах и аппаратах, но и в формировании практического опыта работы с ними через инновационные методы обучения. Лабораторная работа играет ключевую роль: студенты активно вовлекаются в синтез органических соединений, мономеров и полимеров на практике. В частности:

- разработана методика синтеза новых диэтинилсодержащих мономеров;
- проведено исследование процессов получения соответствующих полимерных материалов.

Этот подход не только углубляет понимание процессов химической технологии, но и стимулирует инновационное мышление среди будущих специалистов.

Экспериментальная часть

Синтез нового диэтинилсодержащего мономера на основе калиевого дикетоксимата 4,4'-ДАцДФО и п-диэтинилбензола

Реакция гетероциклизации в ДМСО:

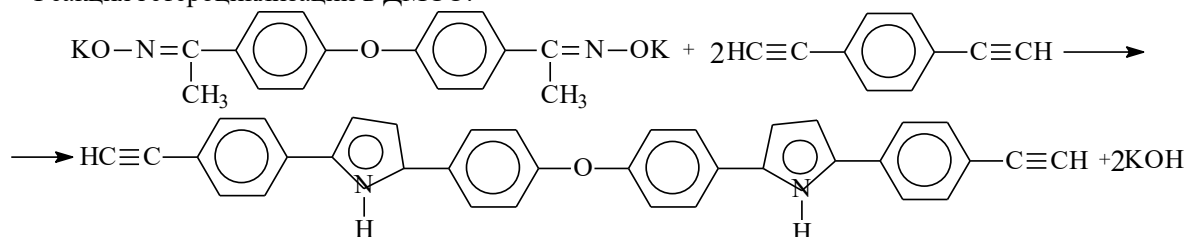
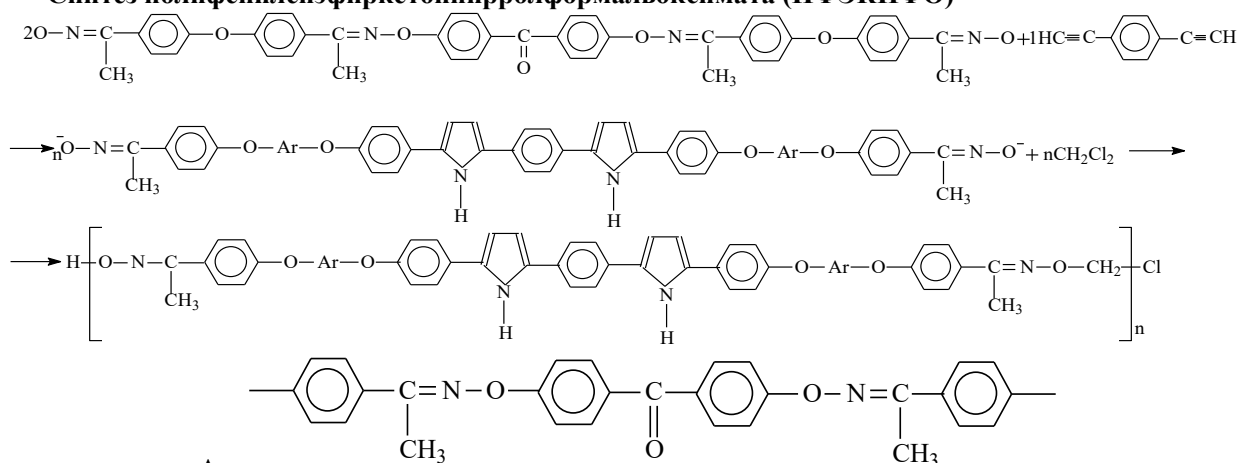


Схема 1 - Реакция проводилась при соотношении дикетоксим 4,4'-диацетилдифенилоксида: п-диэтинилбензол = 1:2 (моль), концентрация по модельному соединению в ДМСО составила 0,4 моль/л [1]. Выход продукта – 85 %.

Синтез полифениленэфиркетонпирролформальоксимата (ПФЭКПФО)



где Ar-

В реактор, снабженную мешалкой, трубкой для подачи азота и насадкой для азеотропной отгонки воды, продували азотом, затем загружали дикетоксим (0,35 моль), КОН (0,07 моль), постепенно приливали диметилсульфоксид, толуол (по 10 мл) 70 мл, температуру поднимали до 135°C. После отгонки азеотропы добавили дихлорбензофенона (0,175 моль), температуру поднимали до 160°C и продержали реакционную массу при перемешивании еще 3 часа. Понижали температуру реакционной среды до 120 °C и затем добавили диэтинилбензол (0,00875 моль). Синтез продолжали 2 часа при этой же температуре. Затем при температуре 60°C в реакционную смесь добавляли хлористый метилен в необходимом избытке (0,8002 моль) и катализатор переносчика фаз тетрабутиламмонийбромид (0,35 моль). Продолжали синтез при той же температуре еще 3 часа. Полученное вещество высаждали в изопропиловый спирт, что обеспечило нейтральную среду для высаживания [2]. Сушили в сушильном шкафу при 50°C, затем при той же температуре под вакуумом. Выход составил 97,6 % (рис.1).



Рисунок 1 - Высаженный полифениленэфиркетонпирролформальоксимата

На основе полученного соединения были приготовлены композиции разных концентраций.

Приготовление композиций осуществлялось смешиванием ингредиентов, для этого готовился 1%-ный раствор синтезированного нами полимера в хлороформе. Полученный раствор смешивался с рассчитанным количеством ПК и ПБТФ, хлороформ испарялся. Полученные образцы подвергались вакуумной сушке при 100°C в течение двух часов для обеспечения полной просушки.

Состав композиций:

Поликарбонат-Carbomix-6 + 0,1%;0,2%;0,5%;0,75%;1% ПФЭКПФО
Полибутилентерефталат-D 201 +0,1%;0,2%;0,5%;0,75%;1% ПФЭКПФО

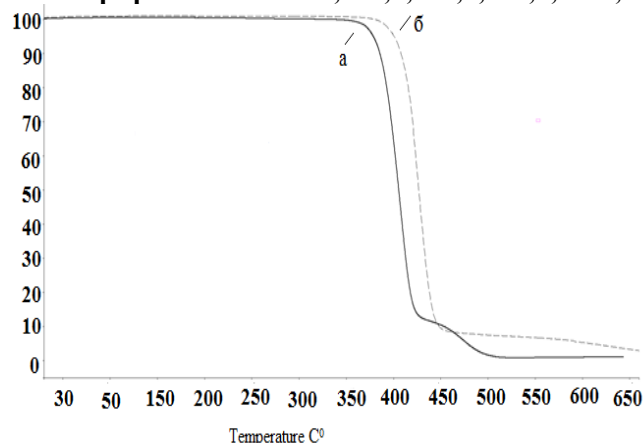


Рисунок 2 – Кривые ТГ: а- ПБТФ; б- ПБТФ + 0,25% ПФЭКПФО

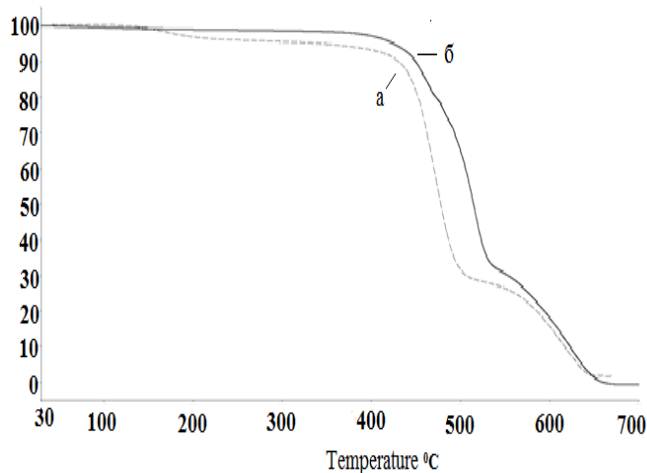


Рисунок 3 - кривые ТГ: а- ПК; б- ПК + 0,5% ПФЭКПФО

Как видно из кривых ТГ (рис.3), добавление полифениленэфиркетонпирролформальоксимата даже в очень маленьких количествах (0,5% к поликарбонату Carbomix-6) или (0,2% к полибутилентерефталату D-201) соответственно приводит к увеличению термостойкости этих полимеров.

Термогравиметрический анализ композита (рис.2) ПК-Carbomix-6 + 0,5% ПФЭКПФО, проведенный на воздухе, показал, что область интенсивной потери массы лежит в интервале температур 440-560°C, коксовый остаток – 6%, 650°C. (рис.2). Термостойкость при этом увеличивается на 30°C. Было сделано заключение, что введение ПФЭКПФО в минимальных дозах (0,5% и 0,2%) в полимеры, производимые в промышленных объемах, способствует повышению их термостойкости и огнестойкости. Разработанный пленкообразующий полифениленэфирпиррол и их сополимеры рекомендуются использовать, как и другие электропроводящие полимеров в устройствах, основанных на электрохимических принципах (устройства записи информации, источники тока, электрохромные приборы, светоизлучающие системы и сенсоры различного рода покрытий). Результаты исследований подтвердили известную тенденцию: чем больше в исходных мономерях, полимерах содержится ароматических карбо- и гетероциклических ядер, тем выше коксовый остаток, тем они менее горючи.

Заключение

Таким образом, вопросы, возникающие в процессе преподавания дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии», имеют разносторонний характер и требуют всестороннего подхода [3]. Конкретные методики, актуальные технологии и интеграция знаний из смежных областей науки становятся необходимыми для подготовки высококвалифицированных специалистов.

Список литературы

1. Коршак В.В, Виноградова С.В. Неравновесная поликонденсация. М.: Наука, 1972. 695 с.
2. Кожемова К.Р. Синтез новых пирролсодержащих мономеров и полимеров реакцией (поли)гетероциклизации. Диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук. Нальчик.: 2015.
3. Нейн Ю.И., Ельцов О.С., Костерина М.Ф. Химия и технология высокомолекулярных соединений: учеб. - метод. пособие / Урал. федер. ун-т. Екатеринбург, 2018. 116с.

УДК 378.1: 66.0

Левданский А.Э., Калишук Д.Г.

«Инженерия химико-технологических процессов» – новая специальность подготовки магистров в Белорусском государственном технологическом университете

Левданский Александр Эдуардович – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой процессов и аппаратов химических производств; alex_levdansky@mail.ru

Калишук Дмитрий Григорьевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры процессов и аппаратов химических производств;

Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»,

Беларусь, Минск, 220630, улица Свердлова, дом 13а.

В тезисах рассмотрены проблемы подготовки магистров по химико-технологическим и смежным специальностям с Республике Беларусь. Представлен перечень химико-технологических специальностей, по которым обучают магистров в Белорусском государственном технологическом университете. Указана актуальность подготовки магистров с широким спектром знаний и навыков в области проектирования, исследования, анализа и оптимизации химико-технологических процессов и аппаратов. Описаны структура учебного плана вновь открытой в Белорусском государственном технологическом университете специальности магистерской подготовки «Инженерия химико-технологических процессов». Приведен перечень основных дисциплин, изучаемых магистрантами указанной специальности. Дана информация о потенциальном трудоустройстве магистров.

Ключевые слова: химико-технологический процесс, инженерия, магистр, проектирование, исследования.

"Engineering of chemical-technological processes" is a new specialty for training masters at the Belarusian State Technological University

Levdanski A.E., Kalishuk D.G.

Educational institution "Belarusian State Technological University",

The theses consider the problems of training masters in chemical engineering and related specialties in the Republic of Belarus. A list of chemical engineering specialties, in which masters are trained at the Belarusian State Technological University, is presented. The relevance of training masters with a wide range of knowledge and skills in the field of design, research, analysis and optimization of chemical engineering processes and devices is indicated. The structure of the curriculum of the newly opened master's degree specialty "Engineering of chemical engineering processes" at the Belarusian State Technological University is described. A list of the main disciplines studied by master's students of this specialty is given. Information on the potential employment of masters is given.

Key words: chemical engineering process, engineering, master, design, research.

Химическая промышленность – одна из важнейших отраслей реального производства в Республике Беларусь. Белорусский государственный технологический университет (БГТУ) является ведущим учебным заведением по подготовке и переподготовке специалистов с высшим образованием для химико-технологического комплекса страны, обслуживающих этот комплекс научно-исследовательских и проектных организаций, а также для смежных отраслей, например, фармацевтической. До 2023 года БГТУ осуществлял набор в магистратуру и подготовку специалистов второй ступени получения высшего образования по следующим специальностям химико-технологического профиля: «Производство неорганических веществ и материалов», «Технология вяжущих веществ, керамических и стеклянных материалов», «Производство и переработка углеводов», «Производство и переработка полимеров и композитов», «Электрохимические производства и защита от коррозии», «Производство продуктов и материалов из растительных полимеров», «Биотехнологические и фармацевтические производства», «Инновационные технологии силикатных строительных материалов и изделий», «Машины, агрегаты и процессы». В 2023 году в РБ был введен в действие новый общегосударственный классификатор специальностей и квалификаций ОКРБ 011-2022. В соответствии с этим в БГТУ начали проводить набор и подготовку магистрантов по системе углубленного высшего образования (специальности «Производство неорганических веществ и материалов», «Производство и переработка углеводов», «Производство продуктов и материалов

из растительных полимеров», «Инновационные технологии силикатных строительных материалов и изделий», «Электрохимические производства и защита от коррозии», «Биотехнологические и фармацевтические производства», «Технология вяжущих веществ, керамических и стекловидных материалов и изделий» и «Управление и охрана водных ресурсов», «Производство и переработка полимеров и композитов») и по системе специального высшего образования («Технология лекарственных препаратов» и «Промышленная биотехнология»). Подготовку магистров химико-технологического профиля по системе углубленного высшего образования в настоящее время в Беларуси также ведут в Белорусском государственном университете пищевых и химических технологий (г. Могилев, специальность «Производство и переработка полимеров и композитов»), в гомельском государственном техническом университете имени П. О. Сухого (специальность «Нефтегазовый инжиниринг») и в Полоцком государственном университете имени Ефросиньи Полоцкой (специальность «Производство и переработка углеводов»). Кроме того, магистратура по специальностям углубленного высшего образования «Машины, агрегаты и процессы» и «Автоматизация» в БГТУ, Белорусском государственном университете пищевых и химических технологий и Полоцком государственном университете имеют профилизацию «Химическая промышленность». Кроме этого, в Белорусском государственном университете пищевых и химических технологий готовят магистров по специальностям, родственными химико-технологическим, а именно, «Производство продуктов питания из растительного сырья» и «Производство продуктов питания из животного сырья». Подготовка специалистов-магистров по всем вышеперечисленным специальностям отвечает кадровым запросам предприятий, учреждений и организаций Беларуси.

Анализ заявок работодателей, общение с выпускниками показали, что существует острая потребность в специалистах с углубленным высшим образованием, обладающих профессиональными знаниями и навыками в области общей инженерии химико-технологических процессов и аппаратов, т.е. подготовленных по специальности «Инженерия химико-технологических процессов». Специалисты с магистерской подготовкой по указанной специальности необходимы для решения технологических, конструкторских и научно-исследовательских, в том числе и инновационных, задач на предприятиях ОАО «Беларускалий», концернов «Белнефтехим» (ОАО «Гродно Азот», ОАО «Гомельский химический завод», ОАО «Нафтан», ОАО «Мозырьский нефтеперерабатывающий завод», ОАО «Завод горного воска», ОАО «Могилевхимволокно», ОАО «Белшина», ОАО «Лакокраска», ОАО «Полоцк-Стекловолокно», ОАО «Крион» и др.) и «Беллесбумпром» (ОАО «Светлогорский целлюлозно-картонный комбинат», Добрушская бумажная фабрика «Герой труда», ОАО «Лесохимик», РУП «Завод газетной бумаги», ОАО «Слонимский картонно-бумажный завод «Альбертин» и др.), холдинга «Белбиофарм» (РУП «Белмедпрепараты», ОАО «Борисовский завод медицинских препаратов», УП «Минскинтеркапс» и др.), а также на предприятиях по производству строительных материалов и изделий (ОАО «Керамин», ОАО «Березастройматериалы», ОАО «Минский завод силикатных изделий» и др.). Указанные специалисты будут востребованы в крупнейших проектных организациях химического профиля Республики Беларусь: ОАО «Белгорхимпром» и ОАО «Гродненский научно-исследовательский и проектный институт азотной промышленности и продуктов органического синтеза». В специалистах, подготовленных в области инженерии химико-технологических процессов, также заинтересованы учреждения Национальной академии наук Беларуси, в первую очередь институты тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова, химии новых материалов, общей и неорганической химии, биоорганической химии, научно-исследовательского центра проблем ресурсосбережения. Профессиональная деятельность магистров со специальностью «Инженерия химико-технологических процессов» будет направлена на проектирование и модернизацию производств, установок и аппаратов, проведение научно-исследовательских работ, связанных с химико-технологическими процессами и аппаратами. Ни по одной из перечисленных в предыдущем абзаце специальностей магистров выпускники не получают навыки и компетенции, соответствующие специальности «Инженерия химико-технологических процессов».

Наличие профессиональных знаний и навыков, приобретенных, как было отмечено ранее, выпускниками магистратуры по специальности «Инженерия химико-технологических процессов», обеспечит их безусловное трудоустройство, а также широкие возможности и перспективы для них на рынке труда. Открытие подготовки по данной специальности – мероприятие, согласующееся с правовыми и нормативными документами Республики Беларусь социально-экономического характера.

Как было отмечено ранее, химические производства являются одними из важнейших в промышленном комплексе Беларуси. Они являются безграничным полем для разработки и внедрения инноваций, взаимодействия и объединения промышленного потенциала с наукой, развития международного научно-технического сотрудничества и т. д. Развитие любой страны на современном этапе развития мировой экономики невозможно без внедрения новых технологий, в том числе и химических, создания инновационных материалов, развития ресурсосбережения и импортозамещения.

Новизна специальности в том, что она по своему содержанию не дублирует ни одну из специальностей направления образования «Инженерия и инженерное дело», группы специальностей «Химическая инженерия и процессы, технологии в области охраны окружающей среды», регламентированных в Беларуси общегосударственным классификатором специальностей и квалификаций ОКРБ 011-2022. Особенность специальности – перенесение основной учебной нагрузки на углубленное изучение инженерии важнейших процессов и аппаратов, общих для различных химических производств. Магистры по заявляемой специальности получают достаточную подготовку к дальнейшей инновационной деятельности в научно-исследовательских и проектно-конструкторских организациях, в инновационных, технологических и подобных отделах предприятий химического и родственных профилей. Это отвечает потребностям рынка труда Беларуси и пожеланиям работодателей.

Специальность «Инженерия химико-технологических процессов» согласуется с Государственной программой инновационного развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы, предполагающей подготовку высококвалифицированных специалистов по новым направлениям. Ни по одной из существующих специальностей высшего образования в Беларуси не готовят специалистов широкого профиля с профессиональными знаниями и навыками, позволяющие им без дополнительного обучения плодотворно работать на любом предприятии, в учреждении, организации химико-технологического и смежных направлений деятельности.

В учебный план специальности «Инженерия химико-технологических процессов» включены дисциплины, которые не изучаются ни в одном из учреждений высшего образования Республики Беларусь, а именно: «Инженерия гидромеханических процессов и аппаратов», «Инженерия тепловых процессов и аппаратов», «Инженерия массообменных процессов и аппаратов», «Инженерия трубопроводного транспорта материалов», «Инженерия измельчения, сортировки и транспорта твердых материалов», «Инженерия процессов и аппаратов разделения многофазных систем», «Производство изделий из полимеров и композиционных материалов», «Проектирование химических производств и предприятий», «Методология научного и инженерного эксперимента». Основная теоретическая база большинства из указанных дисциплин изложена в фундаментальных, ставших классическими учебниках [1, 2], пособиях [3,4], справочниках [5–7]. Сотрудниками кафедры издано пособие [8], которое может быть использовано в числе основных при изучении дисциплины «Инженерия массообменных процессов и аппаратов».

Представленный выше перечень дисциплин, по нашему мнению, делает специальность «Инженерия химико-технологических процессов» родственной направлению подготовки специалистов «Химическая инженерия» (Chemical Engineering), по которому обучение ведется во многих зарубежных странах. Указанное обстоятельство может положительно отразиться на приток в БГТУ иностранных обучающихся, способствовать увеличению экспорта образовательных услуг.

Для магистрантов очной (дневной) формы получения образования по специальности «Инженерия химико-технологических процессов» предусмотрен двухгодичный срок обучения. Для магистрантов заочной формы получения образования срок обучения составляет два с половиной года. Магистранты, обучающиеся за счет бюджетного финансирования, проходят также подготовку и сдачу экзаменов и зачета по программе кандидатского минимума (дисциплины «Философия и методология науки», «Иностранный язык» и «Основы информационных технологий»).

Подготовку по специальности «Инженерия химико-технологических процессов» предполагается осуществлять для предприятий химической и смежных отраслей промышленности, научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций химико-технологического профиля, учреждений образования, а также других предприятий и организаций, ведущих свою деятельность в данной области. Выпускники смогут занимать должности, связанные с проведением и организацией работ по анализу и оптимизации существующих и освоением, разработкой и исследованием новых процессов и аппаратов, а также с проектированием современных производств и оборудования в химической и смежных отраслях промышленности. Они также смогут успешно

применить свои знания в учебных организациях высшего и среднего специального образования. Потребность Беларуси в выпускниках специальности «Инженерия химико-технологических процессов» может составлять до 10 человек ежегодно.

Выпускающей по подготовке магистров по специальности «Инженерия химико-технологических процессов» в БГТУ определена кафедра процессов и аппаратов химических производств. Кафедра располагает достаточной материальной и учебно-методической базой, высококвалифицированным профессорско-преподавательским составом. К учебной работе по подготовке указанных магистров предусмотрено привлечение лучших специалистов кафедр технологии неорганических веществ и общей химической технологии, машин и аппаратов химических и силикатных производств и энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Имеется достаточная база практик на высокотехнологичных предприятиях отрасли, в передовых научно-исследовательских и проектно-конструкторских организациях и учреждениях высшего образования. Кафедра процессов и аппаратов химических производств постоянно выполняет научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по тематике инженерии химико-технологических процессов. На кафедре были подготовлены и защищены три докторские и около 30 кандидатских диссертаций, связанные с тематикой открываемой специальности. По результатам исследований публикуются монографии и статьи, доклады на научных и научно-методических форумах, конференциях и семинарах, подаются заявки на патенты на изобретения и полезные модели. Кафедрой подготовлен и издан большой объем научно-методической и учебно-методической литературы (в том числе за 2001 – 2022 годы 14 учебных пособий с грифом Министерства Образования Республики Беларусь).

Список литературы

1. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973. 751 с.
2. Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс: В 2-х кн./В.Г. Айнштейн [и др.]. Под ред. В.Г. Айнштейна. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. 1758 с.
3. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии: В 2_х кн. М.: химия, 1981. 812 с.
4. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию/ Г.С. Борисов и [и др.] Под ред. Ю.И. Дытнерского. М.: Химия, 1991. 496 с.
5. Справочник химика. Т. 5. М.: Химия, 1966. 974 с.
6. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. 1. СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2004. 848 с.
7. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. 2. СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2006. 948 с.
8. Процессы и аппараты химической технологии. Расчет и проектирование массообменных аппаратов. /Д. Г. Калишук [и др.]. Минск: БГТУ, 2014. 498 с.

УДК 66.021

Липин А.Г., Липин А.А.

Опыт преподавания дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии» в ивановском государственном химико-технологическом университете

Липин Александр Геннадьевич – д.т.н., профессор, профессор кафедры;

Липин Андрей Александрович – д.т.н., доцент, заведующий кафедрой; lipin.a@mail.ru

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет»,

Россия, Иваново, 153000, Шереметевский проспект, дом 7.

В тезисах рассмотрены структура дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии», преподаваемой для студентов очной формы обучения направления «Химическая технология», особенности проведения всех видов занятий и промежуточной аттестации.

Ключевые слова: процессы и аппараты, химическая технология, преподавание, лабораторные работы, курсовой проект, дистанционное обучение

Experience in teaching the discipline "Processes and apparatuses of chemical technology" at Ivanovo State University of Chemistry and Technology

Lipin A.G., Lipin A.A.

Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Ivanovo, Russian Federation

The theses discuss the structure of the discipline "Processes and apparatuses of chemical technology", taught for full-time students of «Chemical Technology» educational program, the specifics of all types of classes and exams.

Key words: processes and apparatuses, chemical technology, teaching, laboratory work, course project, distance learning

Дисциплина «Процессы и аппараты химической технологии» (ПиАХТ) является одной из основных инженерных дисциплин, изучаемых студентами направлений подготовки «Химическая технология», «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии», «Автоматизация технологических процессов и производств». В этом докладе авторы сфокусировали внимание на опыте преподавания дисциплины ПиАХТ в Ивановском государственном химико-технологическом университете для студентов очного отделения, обучающихся по направлению «Химическая технология». Рассмотрена структура дисциплины, особенности проведения всех видов занятий и промежуточной аттестации.

Дисциплина ПиАХТ изучается в течение четвертого и пятого семестров. Аудиторная нагрузка составляет 68 часов в каждом семестре, а общая трудоемкость – 180 часов в четвертом и 144 часа в пятом семестре. Аудиторные занятия включают лекции, лабораторные работы и практические занятия. Промежуточная аттестация проводится в виде экзамена. В пятом семестре параллельно с основными видами аудиторных занятий студенты выполняют курсовой проект.

Первая часть курса включает модули «Гидравлика и гидравлические машины» и «Гидромеханические процессы и аппараты», вторая часть – модули «Тепловые процессы и аппараты» и «Массообменные процессы и аппараты».

Лекции проводятся в аудиториях, оборудованных проектором, либо «умной доской». Количество аудиторных часов, отводимых на лекции, составляет 34 в четвертом семестре и 17 в пятом семестре. Для самостоятельной работы студентов преподавателями кафедры созданы электронные учебники, включающие основной теоретический материал, словарь терминов, тесты для самопроверки после каждой главы, ссылки на учебные видеоролики. Они доступны на образовательном портале ИГХТУ.

На лабораторных занятиях студенты выполняют лабораторные работы и сдают коллоквиумы. В четвертом семестре на лабораторные занятия выделено 17 часов, а в пятом 34 часа. Поэтому по первой части курса запланировано выполнение максимум четырех работ, а по второй части их количество составляет 5-6. Лаборатория кафедры располагает 40 лабораторными установками, позволяющими выполнять работы по всем разделам курса. Примеры лабораторных стендов приведены на рис. 1. Возможно выполнение следующих лабораторных работ:

- определение формы свободной поверхности в цилиндрическом сосуде, вращающемся вокруг вертикальной оси;
- определение гидравлических сопротивлений трубопроводов (рабочая среда – воздух);
- определение гидравлического сопротивления насадочных материалов;
- определение гидравлического сопротивления тарельчатых колонн;

- исследование гидродинамических характеристик насадочного скруббера;
- определение коэффициента расхода при истечении жидкости из отверстий и насадков;
- испытание центробежного насоса;
- испытание вихревого насоса;
- испытание поршневого насоса;
- испытание шестеренчатого насоса;
- исследование процесса фильтрования под вакуумом;
- исследование процесса механического перемешивания в жидких средах;
- исследование процесса псевдооживления дисперсных материалов;
- исследование процесса центрифугирования
- определение коэффициента теплопроводности твердых материалов;
- изучение процесса теплоотдачи при вынужденной конвекции;
- исследование процесса теплопередачи при установившемся режиме в различных типах теплообменников (труба в трубе, одноходовой кожухотрубный, теплообменник с трубками Фильда; кожухотрубный теплообменник с перегородками в межтрубном пространстве);
 - определение коэффициента теплоотдачи при нестационарном процессе конвективного теплообмена в аппарате с циркуляционным перемешиванием;
 - определение коэффициента теплопередачи при нестационарном процессе конвективного теплообмена в кожухотрубчатом теплообменнике;
 - исследование процесса испарительного охлаждения;
 - исследование процесса абсорбции в насадочной колонне.
 - исследование процесса дистилляции с дефлегмацией
 - исследование процесса ректификации в насадочной колонне периодического действия.
 - исследование процесса ректификации в тарельчатой колонне периодического действия.
 - изучение кинетики процесса сушки влажных материалов при различных способах подвода теплоты (терморadiационная сушка, конвективная сушка, сушка под вакуумом);
 - определение параметров воздуха и основных характеристик процесса испарения влаги;
 - изучение процесса кристаллизации солей из растворов в кристаллизаторе периодического действия;
 - изучение процесса электродиализа;
 - исследование процесса адсорбции.
 - исследование процесса ультрафильтрации;
 - исследование процесса нанофильтрации;
 - исследование структуры потока;
 - определение гранулометрического состава дисперсных материалов.

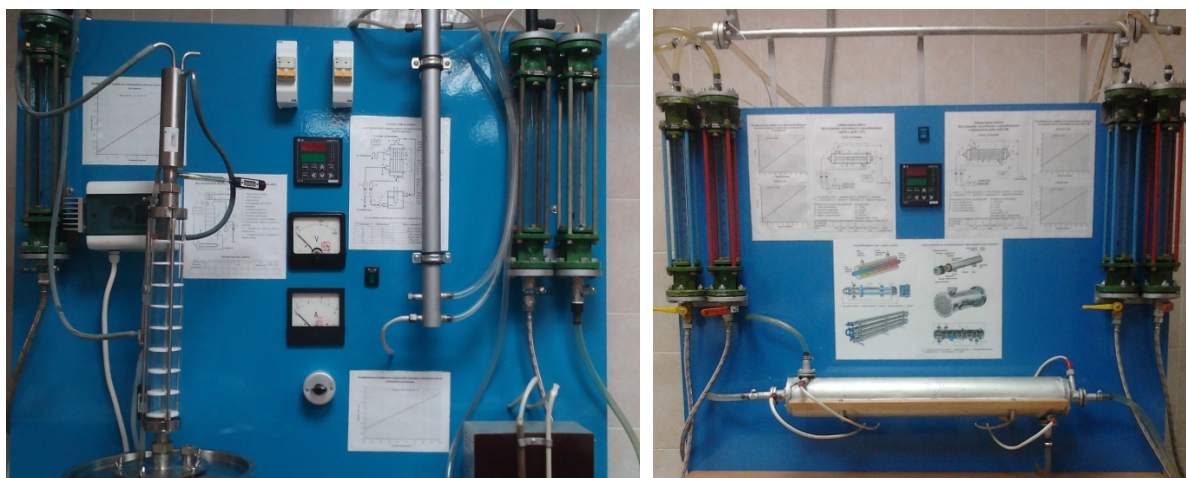


Рисунок 1 - Лабораторные стенды в лаборатории тепло- и массообменных процессов

Кроме реальных лабораторных установок кафедры ПиАХТ ИГХТУ обладает виртуальными лабораторными стендами (рис. 2). Они позволяют существенно расширить возможности

лабораторного практикума. Виртуальные лабораторные стенды обладают следующими преимуществами перед традиционными лабораторными установками: сокращение времени выполнения лабораторной работы; выполнение лабораторной работы при невозможности выполнить физический эксперимент, что особенно актуально при дистанционной форме обучения; возможность генерирования множества вариантов опытных данных, что позволяет реализовать индивидуальное выполнение лабораторной работы каждым студентом [1]. Виртуальная лаборатория показала себя полезным и эффективным инструментом при дистанционном обучении студентов.

Студенты направления подготовки «Химическая технология» при прохождении лабораторного практикума выполняют как правило одну работу на выбор по гидравлике, одну работу, связанную с испытанием насоса, две работы по гидромеханическим процессам, две работы по тепловым процессам, три или четыре работы по массообменным процессам.

Для методического сопровождения лабораторных занятий изданы 4 лабораторных практикума [2-5] (по одному на каждый модуль курса). Они доступны студентам как в печатной, так и в электронной форме. Последняя размещена на образовательном портале ИГХТУ.

Коллоквиумы представляют собой «мини экзамены» по части модуля. Традиционно они проводятся в письменной или устной форме. Количество вопросов в одном билете коллоквиума не превышает двух. В последнее время становится популярной сдача коллоквиума в тестовой форме. Вопрос выбора формы сдачи коллоквиума остается на усмотрение преподавателя. Вместе с коллоквиумом сдаются рассчитанные и оформленные лабораторные работы. При сдаче работы студент отвечает на вопросы по теме работы.

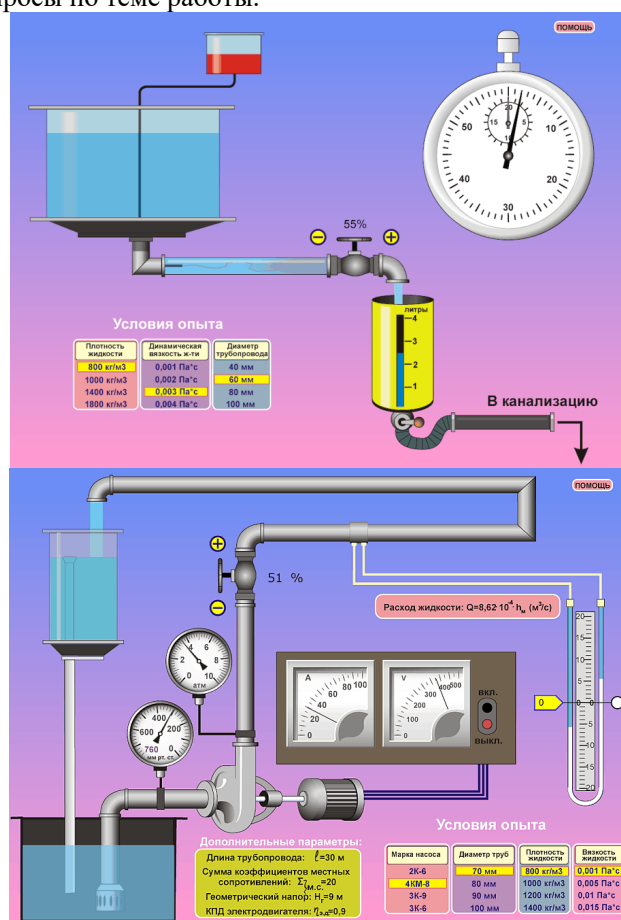


Рисунок 2 - Примеры виртуальных лабораторных стендов

На практических занятиях решаются задачи. На них отводится по 17 часов в каждом семестре. Как правило занятия строятся по следующей схеме: сначала преподаватель объясняет тему и разбирает пример задачи, затем студенты самостоятельно решают другие задачи по этой же теме. Тематики практических занятий приведены в таблице 1. Для методического сопровождения практических занятий написаны и изданы три учебных пособия [6-8].

Таблица 1

Тематики практических занятий

Модуль дисциплины	Тематика практических занятий
Гидравлика и гидравлические машины	Расчет трубопровода. Подбор насоса.
Гидромеханические процессы и аппараты	Расчет отстойника. Расчет процесса фильтрации. Расчет процесса центрифугирования. Расчет и подбор циклона. Расчет процесса механического перемешивания. Расчет процесса псевдоожижения.
Тепловые процессы и аппараты	Теплопередача. Расчет кожухотрубчатых теплообменников для различных процессов (нагревание, охлаждение, конденсация). (Тепловой баланс, коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи. Поверхность теплопередачи.)
	Выпаривание. Расчет выпарной установки. (Материальный и тепловой балансы. Температура кипения раствора, потери полезной разности температур).
Массообменные процессы и аппараты	Массопередача. Способы выражения концентраций. Абсорбция. Расчет насадочного абсорбера. (Материальный и тепловой балансы. Построение равновесной и рабочей линий. Расчет расходов компонентов, диаметра и высоты насадки).
	Ректификация. Расчет тарельчатой ректификационной колонны непрерывного действия. (Материальный баланс. Построение рабочих, равновесной, кинетической линий. Определение диаметра, теоретического и действительного числа тарелок, высоты колонны).
	Сушка. Расчет воздушной калориферной сушилки. (Материальный и тепловой балансы. Построение процесса сушки на I-x диаграмме для влажного воздуха. Определение расходов воздуха и теплоты на проведение процесса. Поверхность испарения.

Промежуточная аттестация по предмету проводится в форме экзамена. Возможны два варианта сдачи: тестом и письменно. Тест предполагает базовый уровень подготовки, а письменный экзамен – продвинутый. Максимальная оценка за тест составляет 86 % от максимальной оценки за письменный экзамен. Экзамен в тестовой форме проводится в дисплейном классе кафедры. Тесты формируются на образовательном портале ИГХТУ путём случайного выбора вопросов из банка вопросов. Последний насчитывает порядка 750 вопросов, разбитых по категориям. Каждая категория соответствует определённой теме. Например, конструкции отстойников, теория фильтрации и т.д.

В ИГХТУ принята 100 балльная система оценки. При этом 50 баллов студент может получить в семестре и 50 на экзамене. Баллы семестра распределяются следующим образом: 30 на лабораторные занятия и 20 на практические занятия. В ведомость и зачетную книжку проставляется оценка и баллы. Распределение баллов следующее: 52-69 – «удовлетворительно», 70-84 – «хорошо», 85-100 – «отлично».

Курсовой проект выполняется студентами направления подготовки «Химическая технология» в пятом семестре. Аудиторных часов в учебной нагрузке не предусмотрено, консультирование студентов проводится в рамках «контактной работы». На каждого студента преподавателю отводится 3 часа.

Примерная тематика курсовых проектов:

1. Проектирование теплообменников (кожухотрубчатых, спиральных, змеевиковых, пластинчатых, с воздушным охлаждением, «труба в трубе»).
2. Проектирование выпарных аппаратов (однокорпусные и многокорпусные установки).

3. Проектирование насадочных и барботажных абсорбционных колонн.
4. Проектирование насадочных и барботажных ректификационных колонн.
5. Проектирование сушильных установок (барабанных, распылительных, со взвешенным слоем материала).

6. Проектирование адсорбционных установок.
7. Проектирование емкостных химических реакторов.

При расчете аппарата студенты могут пользоваться компьютерами в дисплейном классе кафедры. Преподавателями кафедры разработаны программы, позволяющие рассчитать, например, оптимальное флегмовое число при расчёте ректификационной колонны, химическую кинетику при расчете емкостного реактора.

Чертеж аппарата выполняется на листе формата А1 как правило в САПР КОМПАС 3D и распечатывается. Пояснительная записка к курсовому проекту сдается в печатном виде. Итоговая аттестация по курсовому проекту проводится в форме зачёта с оценкой.

Для методического сопровождения курсового проектирования изданы 15 учебных пособий.

Образовательный портал ИГХТУ является полезным инструментом при реализации дисциплины ПиАХТ. На странице курса ПиАХТ в образовательном портале размещены презентации и конспекты лекций, учебные видеоролики, методические указания и учебные пособия, тесты для самоподготовки, тесты для сдачи коллоквиумов и экзаменационные тесты. Эти материалы используются студентами всех форм обучения.

При обучении в дистанционном формате Образовательный портал становится незаменимым и единственным инструментом. Все виды занятий проводятся в режиме видеоконференции (инструмент BigBlueButton), выполненные лабораторные работы и задачи студенты прикрепляют ответом в инструменте «Задание». Для связи с преподавателем вне часов занятия студент может воспользоваться форумом, написать комментарий к ответу на задание или написать личное сообщение.

Кафедрой постоянно ведется актуализация информации на образовательном портале, в планах есть создание видеолекций по курсу.

Список литературы

1. Липин, А. Г. Создание виртуальных лабораторных стендов в среде Labview / А. Г. Липин, А. А. Липин // Качество образования в современном университете: интеграция профессиональной компетентности, студенческой науки, воспитательного процесса": Сборник материалов всероссийской научно-методической конференции с международным участием, Иваново, 26–28 января 2021 года. – Иваново: Ивановский государственный химико-технологический университет, 2021. – С. 86-87.
2. Кириллов, Д. В. Лабораторный практикум по гидравлике и гидравлическим машинам / Д.В. Кириллов, А. В. Шибашов, А. Г. Липин; Иван. гос. хим.- технол. ун-т. – Иваново, 2012. – 127 с.
3. Липин, А.А. Лабораторный практикум по гидромеханическим процессам: учеб. пособие / А.А. Липин, А.Г. Липин, А.В. Шибашов, А.С. Шуваева; Ивановский государственный химико-технологический университет. – Иваново, 2024. – 94 с.
4. Тепловые процессы: учеб. пособие / [А.Г. Липин и др.]; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2018.– 80 с.
5. Липин, А.Г. Массообменные процессы. Лабораторные занятия: учебное пособие / А. Г. Липин, А.А. Липин, В.Н. Исаев, Ю.Е. Романенко; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2022. – 180 с.
6. Барулин Е.П. Тепловые и диффузионные процессы: учеб. пособие / Е.П. Барулин, В.Н. Исаев, А.И. Сокольский; Иван. Гос. хим. – технол. ун-т. – Иваново, 2008. – 104 с.
7. Исаев В.Н. Гидромеханические процессы: учебное пособие для практических занятий / В.Н. Исаев, Д.В. Кириллов, А.Г. Липин; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2014. - 76 с.
8. Липин, А. А. Расчеты гидромеханических процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие / А. А. Липин, А. В. Шибашов, А. С. Шуваева; Ивановский государственный химико-технологический университет. – Иваново, 2023. – 108 с.

УДК 663.5

Рузанов С.Р.

Некоторые аспекты постановки курса "процессы и аппараты химической технологии"

Рузанов Сергей Романович – к.т.н., доцент кафедры; rsr-rus@inbox.ru;

ФГБОУ ВО "Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева",
Н.Новгород, Россия.603950, Н.Новгород, ГСП-41, ул. Минина, 24.

В тезисах рассмотрены некоторые аспекты постановки курса "Процессы и аппараты химической технологии" при подготовке бакалавров по направлениям подготовки "Технологическое оборудование химических и нефтехимических производств" и "Химическая технология органических веществ". Сформулированы задачи лабораторного практикума по курсу, предложены варианты решения поставленных задач на примере лабораторных работ "Испытание лабораторного вакуум-фильтра" и "Изучение процесса сушки в воздушной циркуляционной сушилке". Приводятся схемы лабораторных установок с указанием фиксируемых параметров. Представлены результаты выполнения студентами работ и методики обработки опытных данных, в основу которой положена графическая и математическая обработка современными методами. Предлагаемый в работе комплексный подход к выполнению лабораторного практикума способствует формированию у студентов инженерного мышления.

Ключевые слова: процессы и аппараты, нагрузка, лабораторный практикум, фильтрование, сушка.

Some aspects of the formulation of the course "processes and devices of chemical technology"

Ruzanov S.R.

Nizhegorodski state technical university the name of R.E. Alekseeva, N.Novgorod, Russia, 603950, N.Novgorod, GSP- 41, street of Minina, 24

The theses discusses some aspects of the formulation of the course "Processes and apparatuses of chemical technology" in the preparation of bachelors in the fields of "Technological equipment of chemical and petrochemical industries" and "Chemical technology of organic substances". The tasks of the laboratory workshop on the course are formulated, options for solving the tasks are proposed using the example of laboratory work "Testing a laboratory vacuum filter" and "Studying the drying process in an air circulation dryer". Diagrams of laboratory installations with indication of fixed parameters are given. The results of the students' work and methods of processing experimental data, based on graphical and mathematical processing using modern methods, are presented. The integrated approach to laboratory practice proposed in the work contributes to the formation of engineering thinking among students.

Key words: processes and apparatuses, load, laboratory practice, filtration, drying.

Курс "Процессы и аппараты химической технологии" (ПАХТ) - дисциплина профессионального цикла подготовки студентов химико-технологических и механических специальностей. При освоении дисциплины требуются знания физики, химии, термодинамики, механики и т.д. Глубина и эффективность освоения курса ПАХТ зависит от аудиторной работы со студентами, которая включает лекции, практические занятия, лабораторный практикум и курсовой проект.

Автор более 40 лет преподает курс ПАХТ по направлениям подготовки "Технологическое оборудование химических и нефтехимических производств" ("Машины и аппараты химических производств") и "Химическая технология природных энергоносителей и углеродных материалов" ("Химическая технология органических веществ"). При подготовке специалистов (инженер-механик, инженер-технолог) срок обучения составлял 5 лет, после перехода на подготовку бакалавров срок обучения снизился до 4 лет (на 20 %).

В таблице 1 приведен объем аудиторной работы по курсу ПАХТ для указанных направлений подготовки в промежутке 1989-2024 г.

Таблица 1

Объем аудиторной работы по курсу ПАХТ

Вид работы	Специальность (направление подготовки)					
	МАХП			ХТОВ		
	1989	2011	2024	1989	2011	2024
1. Аудиторная работа, в т.ч.:	180	180	153	216	126	68
- лекции	108	90	68	108	90	34
- лабораторный практикум	36	54	51	108	36	34
- практические занятия	36	36	34	-	-	-
2. Семестр	6,7,8	5,6	5,6	5,6,7	5,6	5
3. Курсовой проект (кп)/работа (кр)	кп (8)	кп (6)	кп (6)	кп (7)	кр (6)	-
4. Экзамен (э)/зачет (з)	6э,7э	5з, 6э	5з, 6э	5э, 6э	5э, 6э	5з с оц.

Анализ приведенных данных показывает, что количественные изменения объема аудиторной работы у двух направлений подготовки существенно отличаются.

Так у специальности МАХП снижение аудиторной работы (сравнение с 1989 г.) составило 17,6 %, причем объем лабораторного практикума вырос на 41,6 % в основном за счет снижения лекционной нагрузки (58,8 %). Такое снижение объема аудиторной работы для специальности МАХП вполне объяснимо, так как практически пропорционально снижению общего срока обучения. Основным недостатком действующего в настоящий момент учебного плана направления подготовки "Технологическое оборудование химических и нефтехимических производств", по моему мнению, является выполнение курсового проекта в рамках 6 семестра (чтение курса еще не завершено), что сужает тематику курсовых проектов и осложняет работу студентов над проектом.

Для направления подготовки "Химическая технология природных энергоносителей и углеродных материалов" произошли существенные изменения в учебном плане (начиная с 2022 г. после смены руководства кафедры) по дисциплине ПАХТ. Во-первых, произошло изменение названия курса с ПАХТ на "Технологическое оборудование химических и нефтехимических предприятий", во-вторых, снижение всех видов аудиторной работы составило более чем 3 раза и, в-третьих, исключен из учебного плана курсовой проект (работа). Считаю, что такие кардинальные изменения в преподавании курса ПАХТ снижают формирование компетенций бакалавров по направлению подготовки "Химическая технология природных энергоносителей и углеродных материалов".

Лабораторный практикум по курсу «Процессы и аппараты химической технологии» выполняется студентами с целью закрепления теоретических знаний, изучения современных методов экспериментального исследования гидромеханических, тепловых и массообменных процессов. При выполнении лабораторных работ студенты используют математические модели процессов, а также лабораторные установки, оснащенные датчиками для измерения различных параметров (температур, давлений, скорости, веса и т.д.). В лабораторных экспериментах определяются и исследуются кинетические закономерности изучаемых процессов. При моделировании исследуемых процессов и обработке результатов экспериментов применяются, как универсальные, так и специальные компьютерные программы.

Однако возможности традиционно используемых лабораторных установок ограничены, во-первых, временными рамками занятий, а во-вторых, не всегда позволяют изучать процессы с учетом всех влияющих факторов. Устранить этот недостаток позволяет использование в лабораторном практикуме информационных технологий – виртуальных лабораторных работ [1]. Причем виртуальный лабораторный практикум призван не заменить классический, а дополнить и расширить его за счет интерактивного обучения, а значит, существенно повысить качество освоения дисциплины.

Рассмотрим сочетание активного и интерактивного (виртуального) лабораторного практикума на примере лабораторной работы «Испытание лабораторного вакуум-фильтра», которая знакомит студентов с одним из важнейших разделов гидромеханических процессов – «Разделение неоднородных систем методом фильтрования».

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 1.

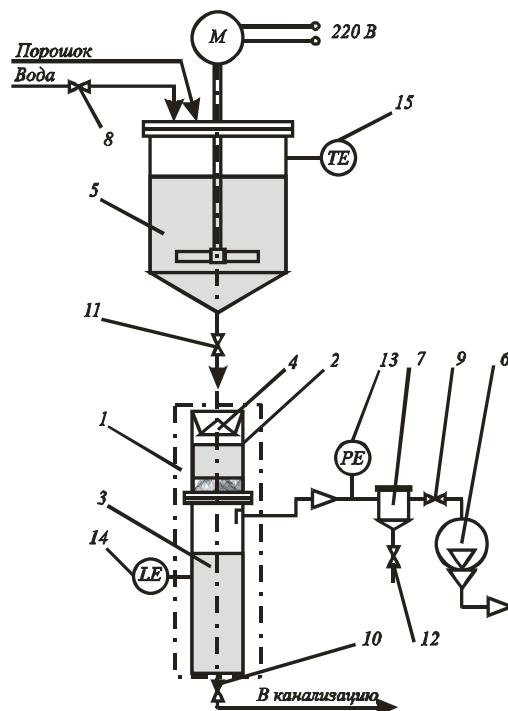


Рисунок 1 - Схема лабораторной установки: 1- нутч-фильтр; 2- царга; 3- сборник фильтрата;

4- распределитель жидкости; 5- бакоч для суспензии; 6- вакуум-наос; 7- брызгоуловитель; 8, 9, 10- вентили; 11, 12- краны; 13- вакуумметр; 14- водомерная линейка; 15- термометр

Целью работы является определение констант фильтрации – удельного сопротивления осадка (индивидуальная характеристика осадка) и сопротивления фильтровальной перегородки (индивидуальная характеристика перегородки), которые необходимо знать при расчете и подборе промышленных фильтров для разделения суспензий.

В основе лабораторной работы лежит основное кинетическое уравнение фильтрации [2]

$$\frac{dV_{\phi}}{Fd\tau} = \frac{\Delta p}{\mu \left(r_{oc} x_{oc} \frac{V_{\phi}}{F} + R_{\phi.п} \right)}, \quad (1)$$

где V_{ϕ} – объем фильтрата, м³;

F – площадь фильтрации, м²;

τ – продолжительность фильтрации, с;

Δp – разность давлений, Па;

μ – вязкость жидкой фазы суспензии, Па·с;

$R_{\phi.п}$ – сопротивление фильтровальной перегородки, м⁻¹;

r_{oc} – удельное сопротивление осадка (сопротивление, оказываемое потоку фильтрата равномерным слоем осадка толщиной 1 м), м⁻²;

x_{oc} – удельный объем осадка (объем осадка, отнесенный к объему фильтрата), м³/м³.

На лабораторной установке фильтрация идет в режиме постоянного перепада давления $\Delta p = \text{const}$. Для этого режима фильтрации после разделения переменных и интегрирования уравнения (1) получим

$$\frac{\mu r_{oc} x_{oc}}{2\Delta p} \left(\frac{V_{\phi}}{F} \right)^2 + \frac{\mu R_{\phi.п}}{\Delta p} \left(\frac{V_{\phi}}{F} \right) = \tau. \quad (2)$$

В уравнении (2) величина V_{ϕ}/F представляет собой удельный объем фильтрата – количество фильтрата на единицу поверхности фильтрации. Если обозначить эту величину через q , уравнение (2) примет вид

$$Aq^2 + Bq = \tau, \quad (3)$$

где A, B – коэффициенты уравнения, включающие константы фильтрования и определяемые по формулам

$$A = \frac{\mu r_{oc} x_{oc}}{2\Delta p}, \quad B = \frac{\mu R_{ф.п}}{\Delta p}. \quad (4)$$

Уравнение (3) может быть преобразовано в линейную зависимость:

$$\frac{\tau}{q} = Aq + B. \quad (5)$$

Эта зависимость на практике используется для нахождения констант фильтрования.

Первичными экспериментальными данными в работе являются данные по накоплению фильтрата в сборнике с течением времени $V_{ф} = f(\tau)$. По результатам обработки этих данных с использованием электронных таблиц EXCEL строят график зависимости (5) в координатах τ/q и q . На рисунке 2 в качестве примера приведены результаты обработки одного из опытов.

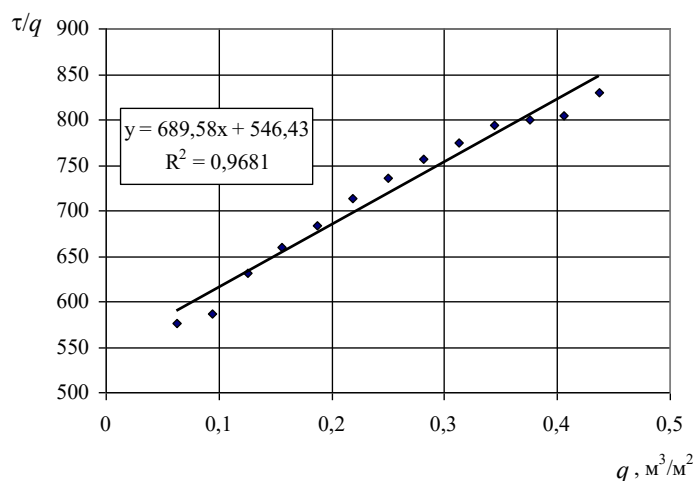


Рисунок 2 - График к определению констант фильтрования

На рисунке 2 приведено уравнение, которое с достаточной точностью (96,8 %) описывает зависимость $\tau/q = f(q)$.

Искомые константы фильтрования легко определяются через численные значения коэффициентов:

- $A = 689,58$ (тангенс угла наклона прямой);
- $B = 546,43$ (отрезок, отсекаемый прямой на оси ординат).

По величине коэффициента A определяется удельное сопротивление осадка r_{oc}

$$r_{oc} = \frac{2\Delta p A}{\mu x_{oc}}, \quad (6)$$

Сопротивление фильтрующей перегородки $R_{ф.п}$ определяется по коэффициенту B

$$R_{ф.п} = \frac{\Delta p B}{\mu}. \quad (7)$$

Так для условий экспериментов, представленных на рисунке 2, значения констант фильтрования составляют

$$r_{oc} = 1,96 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2};$$

$$R_{ф.п.} = 1,98 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-1}.$$

Полученные значения констант сопоставляются студентом с аналогичными характеристиками в справочных материалах по фильтрованию [3, 4].

Интерактивная (виртуальная) часть работы выполняется на компьютере. Виртуальная модель лабораторной работы разработана в среде Flash (рисунок 3).

Рисунок 3 - Заставки виртуальной работы

Программа обеспечивает:

- интерактивное ознакомление с выполнением лабораторной работы;
- ответы на простейшие тесты, по результатам которых программа дает разрешение на выполнение интерактивной части;
- задачу первичных исходных параметров процесса в достаточно широком диапазоне;
- выполнение интерактивного варианта лабораторной работы аналогично последовательности выполнения активной работы, при этом получаем тех же самые опытные величины (рисунок 4).

Обработка результатов интерактивной части лабораторной проводится студентами так же, как и активной. Строится график зависимости $\tau/q = f(q)$ (рисунок 2) и определяются по формулам (6) и (7) константы фильтрования $r_{ос}$ и $R_{фп}$. Результаты расчетов констант сравниваются с величинами, заложенными в алгоритм программы, и характеризующими конкретные виды осадка и фильтровальной перегородки.

Проведение интерактивной части работы при разных исходных данных позволяет наглядно продемонстрировать студентам зависимость констант от вида осадка и фильтровальной перегородки, и их независимость от условий проведения опытов.

Исходные данные:	
$G_0 =$ 3	$x_0 = 0.03$
$r^0 =$ 20	$\Delta p = 0.4$
Вид осадка: 1	
Вид фильтровальной перегородки: 1	

Таблица	
Объем фильтрата, л	Время, сек
0.2	20
0.4	42
0.6	64
0.8	87
1.0	112
1.2	137
1.4	164
1.6	191
1.8	220
2.0	248
2.2	280
2.4	311
2.6	344
2.8	379

Рисунок 4 - Результаты интерактивной части работы

Такой комплексный вариант выполнения лабораторных работ позволяет расширить возможности традиционно используемого лабораторного практикума и в ходе его выполнения изучать процессы с учетом всех определяющих их факторов, что, в свою очередь, развивает творческий подход студентов к работе в лаборатории.

Сушка влажных материалов один из самых сложных химико-технологических процессов. Кинетические закономерности этого процесса изучаются в лабораторной работе «Изучение процесса сушки в воздушной циркуляционной сушилке». При выполнении этой работы студенты не только знакомятся с практической стороной процесса, но и приобретают навык научного исследования.

При выполнении работы студенты знакомятся с целым комплексом теоретических вопросов, связанных с физическими основами процесса сушки, с основными законами теплопередачи и массопередачи. Не менее важны практические вопросы, которые стоят перед студентами при выполнении лабораторной работы — это экспериментальное определение кинетических закономерностей сушки; определение численного значения скорости сушки в первом периоде; определение первой критической влажности материала; расчет расхода тепла на нагрев воздуха; определение численного значения коэффициента влагоотдачи (массоотдачи). Обязательным условием при обработке экспериментальных данных по сушке конкретного материала является использование современных средств обработки результатов, например, электронных таблиц EXCEL.

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 5.

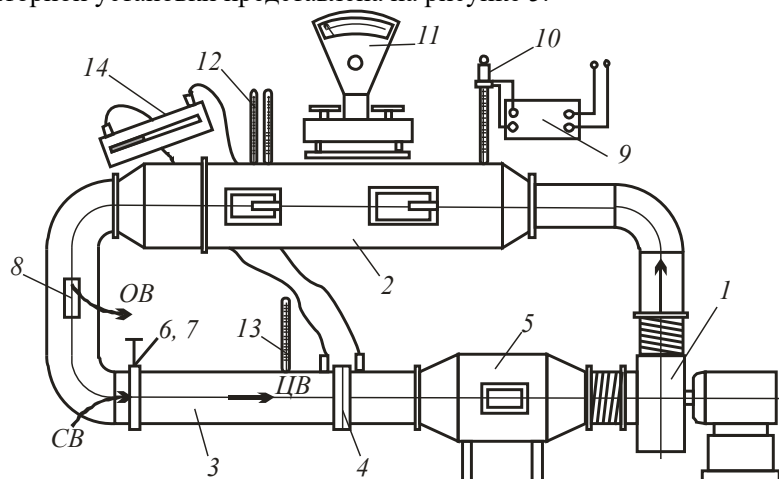


Рисунок 5 - Схема лабораторной установки: 1 – вентилятор; 2 – сушильная камера; 3 – циркуляционная труба; 4 – измерительная диафрагма; 5 – электрокалорифер; 6 и 7 – регулирующие шиберы; 8 – окно; 9 – терморегулятор; 10 – контактный термометр; 11 – весы; 12 – психрометр; 13 – термометр; 14 – наклонный дифференциальный манометр; ОВ – отработанный воздух; СВ – свежий воздух; ЦВ – циркулирующий воздух

Методика выполнения работы предусматривает фиксирование в журнале наблюдений (экспериментальных данных):

- изменений массы высушиваемого образца материала во времени по показаниям весов 11;
- значений температур воздуха в циркуляционной сушилке по показаниям психрометра 12 и термометра 13;
- перепад давления на измерительной диафрагме 4.

Экспериментальные данные по изменению массы высушиваемого образца используются студентами при расчете влажности материала ω^c и при построении кривой сушки $\omega^c = f(\tau)$. Построение кривой сушки проводится с использованием электронных таблиц EXCEL, которые позволяют студенту не только выбрать вид зависимости $\omega^c = f(\tau)$, но и получить ее аппроксимацию математическим выражением.

Пример кривой сушки с аппроксимирующими ее уравнениями приведен на рисунке 6.

При подборе аппроксимирующих уравнений для первого и второго периодов сушки величина достоверности аппроксимации R^2 должна быть не менее 0,95. Для уравнений, аппроксимирующих

опытные данные, представленные на рисунке 2, величина достоверности аппроксимации R^2 составляет для первого периода 0,9951, а для второго периода 0,991.

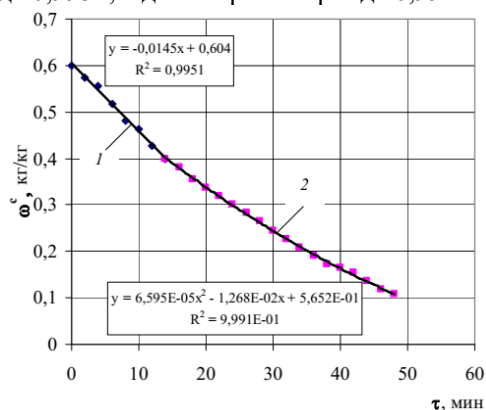


Рисунок 6 - Кривая сушки: 1- первый период сушки; 2- второй период сушки

Математические выражения, полученные при обработке кривой сушки, позволяют студенту быстро определить кинетические характеристики процесса сушки.

В частности, из уравнения первого периода сушки следует, что для испытуемого образца скорость сушки в этом периоде составляет

$$N = - (d\omega^c/d\tau) = 0,0145 \text{ (мин}^{-1}\text{)}. \quad (8)$$

Математическое выражение изменения влажности материала для испытуемого образца во втором периоде сушки представляется в виде

$$\omega^c = 6,595 \cdot 10^{-5} \tau^2 - 1,268 \cdot 10^{-2} \tau + 5,652 \cdot 10^{-1}. \quad (9)$$

Дифференцирование этого выражения позволяет получить зависимость изменения скорости сушки от времени для второго, падающего, периода сушки

$$\frac{d\omega^c}{d\tau} = 13,19 \cdot 10^{-5} \tau - 1,268 \cdot 10^{-2}. \quad (10)$$

Уравнения (10) и (11), в дальнейшем, используются студентом при построении кривой скорости сушки

$$d\omega^c/d\tau = f(\omega^c). \quad (11)$$

Пример кривой сушки для опытного образца приведен на рисунке 7.

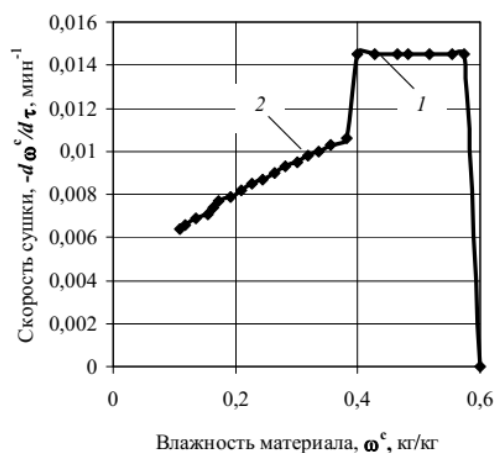


Рисунок 7 - Кривая скорости сушки: 1- первый период сушки; 2- второй период сушки

Дальнейшая методика выполнения работы по изучению кинетики сушки заключается в определении опытного значения коэффициента массоотдачи в газовой фазе для первого периода сушки и последующего его сравнения с расчетными значениями.

Численное значение опытного коэффициента массоотдачи в газовой фазе в первом периоде сушки определяет из известного уравнения массоотдачи [1]

$$\frac{\Delta M}{F \Delta \tau} = \beta_p (p_{\text{нас}} - p_{\text{п}}), \quad (12)$$

где ΔM – изменение массы образца в опыте, определяемое по разности начальной и конечной влажности опытного образца в первом периоде сушки, кг;

F – поверхность образца, м²;

$\Delta \tau$ – интервал времени сушки опытного образца, ч;

$p_{\text{нас}}$ – парциальное давление насыщенного водяного пара, определяемое по температуре мокрого термометра $t_{\text{м}}$ в сушильной камере, мм рт.ст.;

$p_{\text{п}}$ – парциальное давление паров влаги в воздухе сушильной камеры, мм рт.ст.;

β_p – коэффициент массоотдачи в газовой фазе, кг/(м²·ч·мм рт.ст.).

Для сравнения полученного численного значения коэффициента массоотдачи в газовой фазе β_p в первом периоде сушки студентам предлагаются из справочной и учебной литературы [5-8] различные уравнения для расчета соответствующего коэффициента массоотдачи.

Предлагаются следующие расчетные уравнения:

- источник [5]

$$\beta = 0,00168 + 0,00128w, \quad (13)$$

где размерность $[\beta] = [\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{мм вод.ст})]$;

- источник [6]

$$\text{Nu}'_r = 0,347 \text{Re}_r^{0,65} (\text{Pr}'_r)^{0,33} \text{Gu}^{0,135}, \quad (14)$$

где размерность $[\beta] = [\text{м}/\text{с}]$;

- источник [7]

$$\text{Nu}'_r = 2 + 0,83 \text{Re}_r^{0,57} (\text{Pr}'_r)^{0,33}, \quad (15)$$

где размерность $[\beta] = [\text{м}/\text{с}]$;

- источник [8]

$$\beta_p = 5,6 \cdot 10^{-4} (w_p)^{0,8}, \quad (16)$$

где размерность $[\beta] = [\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})]$.

- источник [9]

$$\text{Nu}'_r = 2 + 0,49 \text{Re}_r^{0,61} (\text{Pr}'_r)^{0,33} \text{Gu}^{0,135}, \quad (17)$$

где размерность $[\beta] = [\text{м}/\text{с}]$.

В таблице 2 приведены результаты сравнения коэффициентов массоотдачи в газовой фазе полученные студентами по условиям сушки опытного образца из уравнения (12) и из уравнений (13)–(17).

Таблица 2

Результаты сравнения коэффициентов массоотдачи

Источник коэффициента	Коэффициент массоотдачи, β			
	м/с	кг/(м ² ·ч·мм вод.ст)	кг/(м ² ·ч·мм рт.ст)	кг/(м ² ·ч·Па)
Эксперимент			0,076	
Уравнение (13)		0,0027	0,037	
Уравнение (14)	0,0098		0,029	
Уравнение (15)	0,0144		0,042	
Уравнение (16)			0,062	0,000465
Уравнение (17)	0,0096		0,028	

Завершается работа анализом полученных результатов. Студенты должны сделать выводы о применимости тех или иных уравнений, использованных при обработке опытных данных, пояснить возможные причины погрешностей расчета.

Предлагаемый вариант выполнения лабораторной работы позволяет сформировать творческий подход студентов к работе в лаборатории, заинтересовать их в получении достоверных результатов, научить работе с технической литературой и дать представление о научно-исследовательской деятельности, будущего специалиста.

Хочу отметить, что в настоящее время существуют значительные проблемы, связанные с модернизацией действующих и созданием новых лабораторных установок. Основные причины:

- практически полное отсутствие целевого финансирования на создание и приобретение новейшего лабораторного оборудования;
- сокращение учебно-вспомогательного персонала по обслуживанию действующих технически сложных установок.

В заключении выражаю надежду, что результатом очередной перестройки высшего образования, намеченной на 2026 г., будет, в-первую очередь, подготовка высококвалифицированных инженерных кадров.

Список литературы

1. Гамбург К.С. Виртуальные стендовые лабораторные работы как инновационная форма контекстного обучения: дис.... канд. пед. наук : 13.00.01 Москва, 2006. 186 с. РГБ ОД, 61:07-13/721.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 2009. – 752 с.
3. Жужиков В.А. Фильтрация: Теория и практика разделения суспензий. – М.: Химия, 1980. – 400 с.
4. Малиновская и др. Разделение суспензий в химической промышленности. – М.: Химия, 1983. – 264 с.
5. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 2005. – 576 с.
6. Лабораторный практикум по процессам и аппаратам химической технологии: Учебное пособие. Под ред. проф. Г.С.Дьяконова. Казан. гос. технол. ун-т, Казань, 2005, – 236 с.
7. Плановский А.Н., Николаев П.И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. – М.: Химия, 1987. – 496 с.
8. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. В 2-х кн. Часть 2. Массообменные процессы и аппараты. – М.: Химия, 1995. – 368 с.

УДК 66.081.6:378.147

Селезнев А.В.

Изучение дисциплины «Мембранные процессы» с использованием задач и форм самостоятельной работы студентов творческой направленности

Селезнев Александр Владимирович – к.х.н., доцент кафедры; seleznev@td-sibvinyl.ru

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», 664074,

Иркутск, ул. Лермонтова, дом 83,

В тезисах рассмотрены подходы и мероприятия творческого характера, используемые при изучении дисциплины «Мембранные процессы» в Иркутском национальном исследовательском техническом университете. Приведены примеры задач для решения на практических занятиях и тем для подготовки презентаций в рамках самостоятельной работы студентов.

Ключевые слова: Мембранные процессы, изучение дисциплины, решение творческих задач, самостоятельная работа студентов, подготовка презентаций, мини-конференция.

Study of the discipline "Membrane processes" using tasks and forms of independent work of students with a creative focus

Seleznev A.V.

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

The theses consider approaches and creative activities in studying the discipline "Membrane Processes" at the Irkutsk National Research Technical University. Examples of tasks for solving in practical classes and topics for preparing presentations as part of independent work of students are given.

Key words: Membrane processes, studying the discipline, solving creative problems, independent work of students, preparing presentations, mini-conference.

Дисциплина «Мембранные процессы» в Иркутском национальном исследовательском техническом университете (ИРНИТУ) изучается в течение весеннего семестра второго курса бакалавриата. Данный предмет преподается на кафедре химической технологии студентам очного и заочного обучения направления 18.03.01 «Химическая технология». Результатом изучения дисциплины должно быть сформированные знания у обучающихся теоретических и практических основ процессов и технологий мембранного разделения и умения выбирать соответствующие мембранные процессы для решения конкретных технологических задач. Общая трудоёмкость дисциплины в ИРНИТУ составляет 108 академических часов, в том числе: 32 часа лекции, 32 часа практические (семинарские) занятия и 44 часа самостоятельная работа студентов.

Курс лекций охватывает широкий спектр тем в области мембранного разделения смесей от общих сведений по мембранным процессам до технологических процессов получения полимерных мембран. При подготовке курса лекций использовались различные источники информации, в том числе учебники и монографии выдающегося российского учёного, основоположника теории мембранного разделения Юрия Иосифовича Дытнерского и его школы [1-5]. В качестве примера ниже показано краткое содержание лекции на тему «Баромембранные процессы». Лекция включает следующие подразделы: Движущая сила баромембранных процессов. Объекты, выделяемые из растворов с применением баромембранных технологий. Давление в процессе и размер мембранных пор. Типы используемых мембран. Осмос и обратный осмос. Явление концентрационной поляризации мембран. Нанофильтрация, Ультрафильтрация, Микрофильтрация. Аппараты для баромембранных процессов. Основные факторы, влияющие на баромембранные процессы.

Практические занятия по предмету «Мембранные процессы» нацелены на развитие и закрепление знаний, полученных при слушании лекционного курса, включают в себя изучение дополнительных материалов, решение задач, обсуждение проблем мембранных технологий. Ниже в таблице 1 приведён примерный перечень тем практических занятий.

Таблица 1

Перечень практических занятий

№ п/п	Темы практических (семинарских) занятий	Количество акад. часов
1	Области применения мембранных процессов. Классификация мембранных процессов и мембран. Основные типы мембранных аппаратов. Выполнение проверочной работы 1.	4
2	Методы оценки структуры и свойств мембран. Изучение нормативно-технической документации (ГОСТов), устанавливающих методы определения характеристик мембран.	4
3	Мембранная фильтрация. Изучение дополнительных материалов по теме.	4
4	Изучение дополнительных материалов по теме «Электромембранные процессы». Выполнение проверочной работы 2.	4
5	Изучение дополнительных материалов по теме «Мембранный электролиз»	6
6	Мембранное разделение газов. Изучение дополнительных материалов.	2
7	Мембранное разделение жидкостей – первапорация. Изучение дополнительных материалов.	4
8	Технологические процессы получения полимерных мембран. Изучение дополнительных материалов.	4
	Итого	32

Во время практических занятий решаются задачи по разделению смесей, прежде всего расчетного характера. Это расчеты селективности и проницаемости мембран, материального баланса мембранного блока, факторов мембранного разделения и др. Кроме того, предлагаются задачи, решение которых предполагает неоднозначные ответы, и требуют творческого подхода. Творческие задачи, как правило, неординарные, в них отсутствуют прямые или косвенные указания на явления и закономерности, которыми следует воспользоваться при решении. Ниже показаны примеры таких задач:

Задача 1. В фармацевтическом производстве требуется слабоминерализованная вода, практически не содержащая бактерий и вирусов. Предложите способ получения такой воды исходя из обычной питьевой воды. Объясните, какие технологические приемы, и методы могут быть использованы. В чём их преимущества и недостатки?

Задача 2. В некотором технологическом процессе образуется раствор хлорида цезия с концентрацией 0.4 г/дм^3 . Предложите способ переработки этого раствора для получения в итоге из него раствора с концентрацией $40 - 60 \text{ г/дм}^3$. Как из последнего раствора можно получить раствор гидроксида цезия, не используя при этом никаких дополнительных реагентов?

Задача 3. Предложите способ очистки раствора гидроксида лития от примесей соединений железа, которые содержатся в этом растворе, как в коллоидной, так и в растворённой форме. Объясните, как работают предложенные вами схемы разделения?

Решение задач, требующих творческого подхода, не только повышают интерес студентов к изучаемой дисциплине, но и позволяют преподавателю оценить эффективность и степень усвоения изучаемого материала. Задачи указанного выше типа предлагается решать либо индивидуально, либо коллективно.

В рамках самостоятельной работы студентам при изучении дисциплины «Мембранные процессы» предлагается подготовить презентацию на заданную тему и сделать доклад на мини-конференции. Последняя организуется в конце семестра в рамках учебного процесса. Примерные темы докладов могут быть следующими:

1. Обратный осмос и электродиализ в подготовке воды для повторного использования в промышленности.
2. Перфорированные ионообменные мембраны.
3. Мембраны для первапорации.

4. Мембраны для разделения смесей газов, содержащих углекислый газ.
5. Модификация полимерных мембран для работы в органических растворителях.
- И т.д.

Для подготовки презентаций студенты используют различные источники информации, в том числе специализированные научные журналы. Для облегчения поиска информации рекомендуются научно-технические статьи обзорного характера по теме мембранного разделения смесей [6-9]. В процессе подготовки презентаций студенты приобретают навык работы с научно-технической литературой, развивают способности критического анализа информации.

Список литературы

1. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: Учебник для вузов. Издание 2-е. В 2-х книгах. Часть 2. Массообменные процессы и аппараты. М.: Химия, 1995.- 368с.: ил.
2. Дытнерский Ю.И. Баромембранные процессы: теория и расчет / Дытнерский Ю.И., 1986.- 271 с.
3. 3. Дытнерский Ю. И. Мембранное разделение газов / Юрий Иосифович Дытнерский, Валерий Павлович Брыков, Георгий Гайкович Каграманов, 1991. - 341 с.
4. Дытнерский Ю. И. Мембранные процессы разделения жидких смесей / Ю. И. Дытнерский, 1975. - 229 с.
5. Дытнерский Ю. И. Обратный осмос и ультрафильтрация: монография / Ю. И. Дытнерский, 1978. - 351 с.
6. Ярославцев А.Б. Перфторированные ионообменные мембраны //ВМС. Серия А. Том 55, №11. С.1367-1392
7. Пулялина А.Ю., Полоцкая Г.А. Тойка А.М. Мембранные материалы на основе полигетероариленов и их применение для первапорации // Успехи химии. 2016. Т.85, № 1. С.81-98
8. Алентьев А.Ю., Рыжих В.Е., Белов Н.А. Полимерные материалы для мембранного разделения смесей газов, содержащих CO₂ // ВМС. Серия С. 2021. Т.63, № 2.с.171-189
9. Малахов А.О., Волков А.В. Модификация полимерных мембран для эксплуатации в органических растворителях // ЖПХ. 2020ю т.93. Вып.1. с.20-31

УДК 372.8

Фролова И.В.

Влияние мотивации на процесс изучения курса «Процессы и аппараты химической технологии»

Фролова Ирина Владимировна – к.т.н., доцент НОЦ Н.М. Кижнера ИШНПТ; fiv@tpu.ru.

ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30.

В тезисах рассмотрено влияние мотивации студентов на процесс усвоения знаний в рамках дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии». Предложены критерии для количественной оценки уровня мотивации, а также представлены рекомендации, направленные на повышение степени заинтересованности студентов в изучении данной дисциплины.

Ключевые слова: мотивация, процессы и аппараты химической технологии, методы количественной оценки, инновационное развитие

The influence of motivation on the process of studying the course "Processes and apparatuses of chemical technology"

Frolova I.V.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

The theses examine the influence of students' motivation on the process of acquiring knowledge within the framework of the discipline "Processes and apparatuses of chemical technology". Criteria for quantitative assessment of the level of motivation are proposed, and recommendations are presented aimed at increasing the degree of students' interest in studying this discipline.

Введение

Современная система российского образования претерпела существенные изменения: интеграция в мировое образовательное пространство, внедрение концепции непрерывного образования, смена ведущей образовательной парадигмы, перемены в структуре и содержании образования, развитие новой методологии образования и т.д. Данные процессы как формы проявления новых социально-экономических условий выдвигают новые требования к уровню образованности и развитию личности будущих специалистов, за счет которых формируется интеллектуальный потенциал государства [1].

Преподавание дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии» в профильных вузах является ключом к подготовке высококвалифицированных специалистов в области химической технологии. В условиях стремительного развития научных и технологических достижений, преподавание должно соответствовать новейшим требованиям рынка труда, обеспечивать качество образования и развивать у студентов необходимые профессиональные и личные навыки. [2].

В последние годы в Томском политехническом университете дисциплину "Процессы и аппараты химической технологии" преподают в течение одного семестра в форме лекций, практических и лабораторных занятий, самостоятельной работы студентов, а также курсового проекта. Значительное сокращение времени на изучение курса наложило свою печать на учебный процесс, как для студентов, так и для преподавателей.

Преподавателю необходимо уместить обширный объем учебного материала в ограниченный период времени, что требует от него высокой организации, тщательной подготовки и способности адаптировать материал для эффективного восприятия. Преподаватель вынужден выбирать наиболее важные темы и акценты, чтобы обеспечить базовое понимание и освоение дисциплины.

Для студентов вуза такая сжатая программа обучения означает, что они сталкиваются с необходимостью самостоятельно изучать значительные объемы теории и практики. Это требует от них не только времени, но и высокой степени самодисциплины. В условиях ограниченного времени студенты должны усваивать не только теоретическую часть, но и практические аспекты, что затруднительно без должной поддержки.

В сложившейся ситуации успешное восприятие и усвоение теоретических и практических аспектов дисциплины напрямую зависит от уровня мотивации студентов.

Известно, что студенты, имеющие внутреннюю мотивацию, учатся ради удовлетворения своих интересов и потребностей, стремления к самосовершенствованию и получению знаний.

Внешняя мотивация обусловлена внешними факторами, такими как оценки, награды, стипендии или давление со стороны родителей и преподавателей.

Студенты, обладающие высокой внутренней мотивацией, как правило, обладают большей заинтересованностью в учебном процессе и способны добиваться лучших результатов.

Влияние мотивации на учебный процесс

Мотивация к изучению дисциплины влияет на несколько ключевых аспектов:

- *Уровень вовлеченности студентов:* мотивированные студенты более активно участвуют в учебном процессе, задают вопросы, участвуют в дискуссиях и проектной деятельности. Это ведет к более глубокому пониманию материала и лучшему усвоению информации.
- *Качество усвоения знаний:* высокий уровень мотивации способствует более эффективному запоминанию и применению знаний. Студенты, заинтересованные в изучении курса, повышают свою способность анализировать и решать практические задачи в области химической технологии.
- *Развитие критического мышления:* мотивированные студенты более открыты к новым идеям и подходам, что вдохновляет их на аналитическое и критическое осмысление изучаемого материала. Это необходимо для успешной работы в сложных условиях, характерных для химической технологии.
- *Устойчивость к трудностям:* мотивированные студенты чаще проявляют настойчивость при столкновении с трудностями. Они более склонны искать новые подходы к решению проблем и не сдаются при первых неудачах. Эти качества являются критически важными в области химической технологии, где решения часто требуют глубокого анализа и креативных подходов.

В Томском политехническом университете проведён анализ мотивов и признаков, которые могут служить основой для оценки уровня индивидуальной и групповой мотивации к изучению отдельных дисциплин инженерной программы. Данное исследование охватывает выборки студентов старших курсов ТПУ направления «Химическая технология».

Для анализа мотивации использовался метод экспертного семинара, предложенный Ю.П. Похолковым и К.К. Толкачёвой. Этот подход был протестирован Ассоциацией инженерного образования России и Учебно-научным центром ОТВПО НИ ТПУ в рамках изучения различных аспектов инженерного образования [3-5]. Экспертный семинар явился основным инструментом для глубокого анализа мотивационных факторов, а его результаты могут способствовать формированию новых стратегий в обучении.

Семинар «Оценка уровня мотивации студентов к изучению дисциплины в современном университете» проходил в ТПУ, и его участниками стали действующие преподаватели университета. В мероприятии приняли участие 21 человек, что свидетельствует о высоком интересе к обсуждаемым вопросам и необходимости поиска путей повышения мотивации студентов.

В рамках проведенного семинара были определены ключевые признаки, позволяющие оценить уровень мотивации студентов к изучению дисциплины. Среди таких показателей выделяются: доля свободного времени, посвященного изучению дисциплины; доля посещённых занятий; соотношение набранных баллов к максимальному возможному за данный период; количество дополнительных баллов, полученных по дисциплине, а также доля выполненных заданий заранее или в срок. По мнению экспертов, эти критерии являются основой для количественной оценки мотивации учащихся, что представляет собой важный шаг в понимании их учебной активности.

На следующем этапе семинара разработана матрица индикаторов, которая отражает численные показатели для каждого критерия оценки мотивации студентов в ТПУ. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Матрица признаков, отражающих уровень мотивации студентов к изучению дисциплины

Удельный вес	Критерий	Критически низкий	низкий	средний	хороший	превосходный
0,18	Доля свободного времени, посвященного изучению дисциплины	0,10	0,15	0,30	0,45	0,60
0,19	Доля посещенных занятий по дисциплине	0,20	0,40	0,60	0,75	0,90
0,22	Процент набранных баллов к максимально заданному в данный момент времени	35,00	45,00	60,00	70,00	90,00
0,20	Количество дополнительных баллов, полученных по дисциплине	0,00	2,00	4,00	6,00	8,00
0,21	Доля заданий, выполненных заранее или в срок	0,20	0,35	0,50	0,70	0,90

Для оценки уровня мотивации среди студентов третьего курса направления 18.03.01 «Химическая технология» было проведено онлайн анкетирование. В нем приняли участие 79 студентов из различных специализаций, включая: «Машины и аппараты химических производств» (13 студентов), «Технология нефтегазохимии и полимерных материалов» (18 студентов), «Технология подготовки и переработки нефти и газа» (20 студентов), «Аналитический контроль в химической промышленности» (19 студентов) и «Химическая технология керамических и композиционных материалов» (9 студентов). Результаты анкетирования, представленные в таблице 2, показывают, что уровень мотивации студентов к изучению данной дисциплины находится на достаточно высоком уровне.

Таблица 2

Матрица признаков, отражающих уровень мотивации студентов к изучению дисциплины**«Процессы и аппараты химической технологии»**

10	SQ	Критерий	Критически низкий	низкий	средний	хороший	превосходный
0,18	0,64	Доля свободного времени, посвященного изучению дисциплины	0,15	0,25	0,50	0,75	1,00
0,19	0,92	Доля посещенных занятий по дисциплине	0,22	0,44	0,66	0,80	1,00
0,22	0,97	Процент набранных баллов к максимально заданному в данный момент времени	0,39	0,50	0,67	0,78	1,00
0,20	0,32	Количество дополнительных баллов, полученных по дисциплине	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00
0,21	0,91	Доля заданий, выполненных заранее или в срок	0,22	0,39	0,56	0,78	1,00
1,00	0,76		0,20	0,37	0,58	0,77	1,00

В результате командной работы и дискуссии в ходе экспертного семинара участниками были сформулированы рекомендации по созданию условий, способствующих увеличению уровня мотивации студентов к изучению дисциплины. К ним относятся:

- *Стажировки преподавателей на производство и ПК.* Это позволит им лучше понимать производственные процессы и современные требования к специалистам, что в свою очередь повысит качество преподавания.

- *Проектное обучение по заказам предприятий.* Внедрение практико-ориентированных заданий, выполняемых по заказам реальных компаний, поможет студентам увидеть связь теории и практики, а также развить навыки, востребованные на рынке труда.

- *Повышение интерактивности обучения.* Разработка интерактивных методов обучения, таких как групповые проекты, обсуждения и симуляции, позволит студентам активно участвовать в учебном процессе и повысит их заинтересованность в предмете.

- *Совершенствование лабораторного оборудования.* Оснащение лабораторий современными приборами и технологиями создаст комфортные условия для практического обучения и повысит качество получаемых навыков.

- *Усиление профориентационной работы.* Проведение мероприятий по профориентации среди студентов поможет им лучше понять возможности своей специальности и связь с реальными профессиями, что, в свою очередь, повысит их интерес к обучению.

- *Взаимное посещение занятий.* Налаживание практики взаимного посещения занятий преподавателями позволит обмениваться опытом и внедрять новые образовательные подходы.

Для повышения мотивации студентов к изучению дисциплины ПАХТ в Томском политехническом университете разработаны онлайн-курсы:

- *Гидромеханические и тепловые процессы в химической технологии.* Данный курс охватывает фундаментальные аспекты гидромеханики и теплообмена, ориентируясь на их практическое применение в химической технологии. Курс включает в себя интерактивные элементы, такие как тесты, задания с обратной связью и практические сценарии. Это позволяет студентам не только углубить свои знания, но и увидеть, как теоретические концепции применяются на практике.

- *Массообменные процессы в химической технологии.* Курс сосредоточен на процессе массопередачи, который имеет ключевое значение в различных технологиях, включая дистилляцию, адсорбцию и экстракцию. Он включает в себя интерактивные модули и визуализации, что делает обучение более наглядным и понятным. Онлайн-формат позволяет студентам учиться в удобное для них время, что значительно увеличивает их вовлеченность.

В дополнение к онлайн-курсам, в университете разработаны компьютерные тренажеры, которые позволяют студентам получать практический опыт в условиях, приближенных к реальным:

- *Испытание ректификационной колонны периодического действия.* Тренажёр позволяет студентам изучать работу ректификационной колонны, настраивать параметры и наблюдать за изменениями в процессе разделения компонентов. Виртуальная практика помогает лучше понять динамику процессов, а также развивает навыки анализа и принятия решений.

- *Исследование работы лабораторного фильтр-пресса и определение констант фильтрации.* Компьютерный тренажёр позволяет студентам взаимодействовать с моделью фильтр-пресса в виртуальном пространстве, что способствует более глубокому пониманию принципов работы устройства и процессов фильтрации и делает обучение более увлекательным.

Заключение

Влияние мотивации на обучение по дисциплине "Процессы и аппараты химической технологии" является многогранным и многозначным аспектом, который требует внимательного подхода со стороны преподавателей. Разработка стратегий, способствующих повышению мотивации, не только улучшит обучение студентов, но и подготовит их к успешной карьере в области химической технологии.

Внедрение предложенных рекомендаций может значительно способствовать увеличению уровня мотивации студентов. Создание мотивационной образовательной среды, акцент на практическом применении знаний и активное вовлечение студентов в учебный процесс — вот ключевые аспекты, которые помогут подготовить высококвалифицированных специалистов, способных успешно работать в современных условиях.

Список литературы

1. Похолков Ю. П. Национальная доктрина опережающего инженерного образования России в условиях новой индустриализации: подходы к формированию, цель, принципы // Инженерное образование. – 2012. – № 10. – С. 50–65.
2. Романова М. В. Проблема формирования мотивации студентов во время обучения в вузе // Известия Пензенского государственного педагогического университета им. В. Г. Белинского. – 2006. – № 6. – С. 147.
3. Pokholkov Y. P., Tolkacheva K. K. Why and how to engage students in the learning process // Proceedings of the 43rd SEFI Annual Conference 2015 – Diversity in Engineering Education: an Opportunity to Face the New Trends of Engineering, SEFI 2015. – Orleans, 2015. – P. 141–145.
4. Tolkacheva K. K., Pokholkov Yu. P., Kudryavtsev Yu. M. Role and choice of educational technologies in training of engineers // Kazan science. – 2014. – № 10. – P. 13–17.
5. Толкачева К. К. Экспертный семинар как форма реализации целей проблемно-ориентированного обучения специалистов в области техники и технологии: дис. ... канд. пед. наук: 13.00.08. – Казань, 2015. – 138 с.

УДК 378.147

Шуваева А.С., Шадрина Е.М.

Различные подходы к решению многоуровневых задач в технических дисциплинах

Шуваева Анастасия Сергеевна – к.т.н., доцент кафедры Процессы и аппараты химической технологии;

Шадрина Елена Михайловна - к.т.н., доцент кафедры Процессы и аппараты химической технологии; ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», Россия, Иваново, 153000, Шереметьевский проспект, дом 7, e-mail: akuvsh@mail.ru.

На сегодняшний день существует потребность в ходе учебного процесса проведение различных мастер классов, конкурсов исследовательских работ по различным направлениям науки, техники, культуры, предметных олимпиад, фестивалей, выставок, научно-практических конференций. В представленных материалах рассмотрены различные подходы к решению задач в технических дисциплинах, преподаваемых на кафедре Процессы и аппараты химической технологии. Проведение олимпиад и различных конкурсов обеспечивает развитие и укрепление интеллектуального потенциала обучающихся, стимулирует активность, инициативность, самостоятельность.

Ключевые слова: процессы, аппараты, химическая технология, мотивация, гидравлика, гидродинамика, теплообмен, массообмен.

Different approaches to solving multi-level tasks in technical disciplines

Shuvaeva A.S., Shadrina E.M.

Ivanovo State University of Chemical Technology,

Russian Federation, Ivanovo, 153000, Sheremetyevo Prospekt, 7, e-mail: akuvsh@mail.ru

Today, there is a need for various master classes, research competitions in various fields of science, technology, culture, subject Olympiads, festivals, exhibitions, scientific and practical conferences during the educational process. The presented materials consider various approaches to solving problems in technical disciplines taught at the Department of Processes and Devices of Chemical Technology. Holding Olympiads and various competitions ensures the development and strengthening of students' intellectual potential, stimulates activity, initiative, and independence.

Key words: processes, apparatuses, chemical technology, motivation, hydraulics, hydrodynamics, heat exchange, mass transfer.

Современный студент должен быть готов к принятию решений в будущей профессиональной деятельности, развивать творческие способности, расширять круг интересов. Он должен уметь находить выход из трудных социальных ситуаций в трудовом коллективе, а значит ему необходимо развивать свои интеллектуально-психологические возможности.

Мотивация – это общее название для процессов, методов и средств побуждения студентов к познавательной деятельности, активному освоению дисциплин. Мотивы – это сложные динамические системы, в которых осуществляется выбор и принятие решений, анализ и оценка выбора.

Мотивы – это мобильная система, на которую можно влиять. Даже если выбор будущей профессии студентом был сделан не вполне самостоятельно и недостаточно осознанно, то целенаправленно формируя устойчивую систему мотивов деятельности, можно помочь будущему специалисту в профессиональной адаптации и профессиональном становлении.

Для того чтобы студент по-настоящему включился в работу, нужно, чтобы поставленные в ходе учебной деятельности задачи, были не только понятны, но и внутренне приняты студентом, т. е. чтобы они приобрели значимость для учащегося.

Возможные варианты повышения интереса к учебе и успеваемости вследствие мотивации:

1. Отсутствием интереса к науке порой является низкий уровень знаний по этому предмету, что можно выяснить применением входного теста с вопросами по основным понятиям или законам. Желательно провести занятие по этим темам, прорешать простейшие задачи с целью «подтянуть отстающих».

2. Повышение эффективности лекций с применением презентаций и учебных фильмов, что достигается: увеличением темпа лекций, так как все важные этапы зафиксированы на слайдах и не

приходится тратить время для записей на доске; постоянным наличием информации перед глазами и возвращением к нужной информации при необходимости.

3. Рейтинговая система оценки знаний студентов как основной инструмент оценки работы студента, повышается объективность оценки студенческих достижений в учебе. В рейтинговой системе экзамен перестает быть «последней инстанцией», потому что он только добавит баллы к тем, которые набраны за семестр.

4. Составление сквозных заданий по техническим дисциплинам, позволяющих решать задачи по расчету и выбору оборудования для того или иного технологического процесса. Такой подход успешно применяется на кафедре ПиАХТ при прохождении студентами дисциплин: Механика жидкости и газов, Основы гидравлики и теплотехники, ПиАХТ.

5. Студенты намного больше узнают о выбранной ими профессии во время прохождения практики, выполнении лабораторно-практических работ. Это является стимулом, мотивацией для дальнейшего теоретического обучения, применение полученные знания на практике.

Таким образом, для студентов мотивация является наиболее эффективным способом улучшить процесс обучения, движущей силой процесса обучения и усвоения материала. Мотивация к обучению достаточно непростой и неоднозначный процесс изменения отношения студента, как к отдельному предмету изучения, так и ко всему учебному процессу.

На данный момент при обучении студентов многие преподаватели отмечают особенность молодежи нынешнего поколения - клиповое мышление, для которого характерно фрагментарное восприятие информации. Так мозг адаптируется к огромным информационным и эмоциональным перегрузкам, в которых живёт современный человек. Скорость жизни увеличивается, поток информации неукоснительно растет. Изменить данную тенденцию невозможно, но можно повлиять и направить в нужное русло.

У данного рода мышления есть много недостатков, но есть и преимущества. Появляется высокая скорость обработки информации, её многоканальность, способность работать в режиме многозадачности, с другой стороны - снижается концентрация внимания, появляется рассеянность и забывчивость. За короткий промежуток времени студент не может обработать большой объем информации. Подстроить образование под особенности клипового мышления – вот правильный подход. Используя эджайл и скрам методики, предполагающие разработку проекта, разбивают его на мелкие части и задания, т.е. последовательно выполняются простые задачи как составные части большого логического задания.

Студентами направления «Автоматизация технологических процессов и производств» изучаются смежные дисциплины на кафедре Процессов и аппаратов химической технологии: 4 семестр – «Основы гидравлики и теплотехники» (ОГиТТ), 5 семестр – «Процессы и аппараты химической технологии» (ПиАХТ). В дисциплине ОГиТТ изучаются: основы гидравлики; термодинамические законы с идеальными и реальными газами; циклы тепловых и холодильных машин. В дисциплине ПиАХТ изучаются: основы гидромеханики (перемешивание, псевдоожижение, фильтрование, электроочистка, центрифугирование и др.), тепловые процессы; выпаривание; массообменные процессы: абсорбция, ректификация, сушка и другие [1].

Преподавателями составлены сквозные задачи в рамках данных дисциплин, например, расчет холодильной установки разбивается на ряд задач и подзадач: 1) выбор хладагента, построение заданного термодинамического цикла и определение параметров характеристических точек; 2) расчет процессов цикла: сжатия в компрессоре (одно- или многоступенчатое) – с использованием законов технической термодинамики, выбор марки компрессора по рассчитанной производительности и мощности; процессы охлаждения в конденсаторе и нагрева в испарителе.

Данный подход планируется применить для связки обеих дисциплин ОГиТТ и ПиАХТ при расчете отдельных технологических линий, например, отделение очистки отходящих газов от вредных продуктов включает расчет: абсорбера, теплообменных аппаратов для охлаждения газовых и жидкостных потоков, компрессора для сжатия газа и насоса для подачи жидкости, определение гидравлических потерь в аппаратах [2].

Определение гидравлических потерь в аппаратах и трубопроводах проводится в следующем порядке: 1) определение теплофизических характеристик (использование справочной литературы); 2) скорости газовых или жидкостных потоков (расчетное задание); 3) гидравлические потери в аппаратах и трубопроводах (лабораторная работа по определению коэффициента трения и задача на потери напора).

Подбор компрессорной машины для сжатия газа и насоса для подачи жидкости производится поэтапно: 1) расчет цикла компрессора, определение мощности (расчетное задание); 2) выбор компрессора (работа с каталогом); 3) снятие характеристики насоса (лабораторная работа); 4) расчет напора насоса (расчетное задание); 5) выбор насоса по напору и подаче (работа с каталогом).

Расчет теплообменных аппаратов для охлаждения газовых и жидкостных потоков проводится следующим образом: 1) определение коэффициентов теплопередачи (лабораторная работа); 2) расчет поверхности теплообмена (расчетное задание); 3) выбор теплообменного аппарата по поверхности теплообмена (работа с каталогом).

Проектирование абсорбера включает выполнение следующих задач: 1) выбор конструкции абсорбера (работа с каталогом); 2) построение равновесной и рабочих линий, определение средней движущей силы (лабораторная работа); 3) определение числа и высоты единиц переноса, поверхности массопередачи (расчетное задание); 3) подбор конструктивных элементов аппарата (расчет и работа со справочником).

Фактически такую задачу решают студенты - технологи при выполнении курсового проекта по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии», но одномоментное задание сопряжено с определенными трудностями и зачастую приводит к недостатку времени для освоения представленной тематики. Выполнение же отдельных задач в течение семестра, как элементов поможет студентам не потерять вовлеченность и мотивацию, а также повысить качество навыков в управлении химико-технологическими системами. Преподаватель в свою очередь видит и реагирует на то, что кто-то из студентов не справляется и отстает, у кого возникли проблемы. Конечно, составление таких задач требует много времени и сил, а воплощение в учебный процесс – определенных сложностей, но данная методика постепенно разрабатывается и внедряется преподавателями кафедры Процессов и аппаратов химической технологии.

В результате вышесказанного можно сделать вывод, что на данный момент существует потребность в проведении в ходе учебного процесса различных мастер классов, конкурсов исследовательских работ по различным направлениям науки, техники, культуры, предметных олимпиад, фестивалей, выставок, научно-практических конференций.

Для осуществления «негласного» контроля и оценки знаний студентов проводятся олимпиады, турниры, конкурсы.

Предметные олимпиады можно проводить различными способами и в несколько этапов. Например, теоретическая часть олимпиады может представлять собой письменное или электронное тестирование обучающихся по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии», предназначенное для оценки уровня сформированности знаний и умений обучающихся. Тестирование позволяет выставить объективную оценку, которая соответствует подлинному качеству знаний и умений. Средством (инструментом) для оценки уровня сформированности знаний и умений, обучающихся по дисциплине при проведении теоретической части олимпиады предлагается разноуровневый тест.

Практическая часть олимпиады по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии» состоит из решения олимпиадных задач, направленных на закрепление знаний и умений, полученных на занятиях; отработку навыков в решении наиболее сложных задач, составленных с учетом профиля подготовки обучающихся по специальностям; закрепление методик расчетов, которые составлены с учетом конкретной профессиональной деятельности. Практическое задание предусматривает проверку освоения умений по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии» и нестандартный подход к решению олимпиадных задач по гидродинамике и гидравлике, тепловым и массообменным процессам.

На кафедре процессов и аппаратов химической технологии олимпиада по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии» проводится последние два года. На данном этапе проведение олимпиады ограничивается выполнением одного уровня (выполнение теоретическо-практических заданий). Целью олимпиады является повышение уровня знаний, познавательной активности, выявление и поддержка талантливых студентов, изучающих курс ПиАХТ. В ней принимают участие студенты третьего курса всех факультетов, которые изучили все разделы данной дисциплины. Студенты с большим интересом учувствуют в данной олимпиаде. Готовясь к олимпиадным заданиям, студенты более тщательно и широко прорабатывают материал, а также повторяют ранее изученный и некоторые вопросы могут увидеть в ином ракурсе – не принимаемом до этого во внимание. В результате проведенной олимпиады получают дипломы за призовые места,

сертификаты участников, а также поощрительные баллы, что повышает итоговый рейтинг и оценку на итоговом экзамене по дисциплине ПиАХТ.

В первый и второй год проведения олимпиады участвовало примерно одинаковое количество студентов разных факультетов Ивановского химико-технологического университета. Участникам обычно предстояло решить четыре задачи: две теоретических и две практических. Задачи затрагивали такие темы как истечение при переменном уровне, расчет напора насосной установки, перемешивание неоднородных систем, теплопроводность, процесс теплопередачи, расчет теплообменного аппарата, ректификацию, абсорбцию. Особые трудности у студентов вызывают задания, связанные с получением (выводом) закономерностей изменений физических величин от тех или иных параметров, так как в основном при их выполнении требуется логико-аналитический подход. Более легко выполняются задания, связанные с расчетами. С основными расчетами студенты знакомятся на практических занятиях по данной дисциплине, этих знаний достаточно для решения расчетной части олимпиадных заданий. Решение задач выполняется участниками олимпиады на специальных бланках, с составлением рисунка и решения с пояснениями к каждой задаче. Время, которое отводится на выполнение практической части задания, как показывает практика, не должно превышать 2 академических часов (90 минут), студенты достаточно успешно справляются с заданиями за выделенное время.

После выполнения всеми участниками олимпиады практической части и подсчета количества баллов, заполняется протокол итогов практической части, в котором указывают количество баллов за каждую выполненную задачу олимпиады, а также общее количество баллов и место участника олимпиады по итогам проведенной практической части олимпиады.

В олимпиадах участвуют все желающие, а не только студенты с высокими показателями по данному курсу. Обучающимся с невысокой успеваемостью рекомендуется участие в такого вида конкурсных мероприятиях, так как это повышает интерес к выбранной дисциплине, стимулирует развитие и мотивацию к процессу обучения. Проведение олимпиад и различных конкурсов обеспечивает развитие и укрепление интеллектуального потенциала обучающихся, стимулирует активность, инициативность и самостоятельность.

Список литературы

1. Баранов Д. А. Процессы и аппараты химической технологии: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань», 2016 — 408 с.
2. Кормина Л. А. Технологии очистки газовых выбросов [Электрон. ресурс]: учебное пособие. / Л. А. Кормина, Ю. С. Лазуткина. – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 2.9 МБ).– Барнаул, Изд-во АлтГТУ, 2019. – 263 с.

УДК 37.013.2

Щетинина Ю.В., Рештаненко А.А., Голованов И.Ю.

Потенциал использования интерактивных технологий в литературе по процессам и аппаратам химической технологии

Щетинина Юлия Викторовна – студент; julvikk@mail.ru

Рештаненко Анна Александровна – преподаватель; ann.reshtanenko@gmail.com

Голованов Иван Юрьевич – к.т.н., ассистент; igol95@yandex.ru

ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»,

Россия, Москва, 107023, ул. Большая Семеновская, дом 38.

Развитие учебной, научной и методической литературы необходимо для повышения уровня образования, возможности передачи информации о современных быстро развивающихся направлениях как в области процессов и аппаратов химической технологии, так и в смежных сферах. Включение в структуру текста креолизованного текста – разновидности паралингвистических средств (принадлежащих к другим знаковым системам, нежели язык), позволяет существенно повысить их информативность, расширить и углубить знания читателей и обучающихся.

Ключевые слова: учебная литература, научная литература, креолизованный текст, интерактивные технологии.

The potential of using interactive technologies in the literature on chemical technology processes and apparatuses

Shchetinina Yu.V., Reshtanenko A.A., Golovanov I.Yu.

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

The development of educational, scientific and methodological literature is necessary to improve the level of education, the ability to transmit information about modern rapidly developing areas both in the field of processes and devices of chemical technology and in related areas. The inclusion of creolized text in the structure of the text - a type of paralinguistic means (belonging to other sign systems than language), allows to significantly increase their information content, expand and deepen the knowledge of readers and students.

Key words: educational literature, scientific literature, creolized text, interactive technologies.

Введение

В современной литературе практически всех областей науки присутствует невербальная составляющая представленного материала. Так, широко используются графики и гистограммы, позволяющие упростить восприятие обобщения большого объема информации по определенному направлению, определенному критерию для дальнейшего сравнительного анализа. Таблицы позволяют свести большое количество различных критериев и характеристик разных объектов в удобную для восприятия форму. Формулы значительно сокращают объем публикации для описания, моделирования и прогнозирования протекания различных процессов.

В технике невербальная составляющая играет особо важную роль – представление познавательной сущности всего материала [1].

QR-код (от английского quick response – быстрый ответ) может стать той невербальной составляющей текста или вариативным компонентом креолизованного текста, который позволит расширить знания в отдельной области техники и углубить их при изучении конкретных особенностей различных технических объектов и процессов. Восприятие этого элемента текста исключительно как иллюстративного компонента в корне не верно, например, Дубовицкая Л.В [2] пишет о том, что QR-код выносится за пределы существующей парадигмы «вербальности-невербальности» информации, так как в настоящее время природа данного элемента не изучена.

QR-код изначально был создан исключительно для упрощения логистических операций, однако в современном мире он все более широко используется в разных сферах промышленности и быта. Код представляет собой двумерный штрихкод, матрицу из черных и белых квадратов, в которой содержится пиксельная шифровка не ограниченной по объему информации. Очевидно, что в эпоху повсеместной цифровизации он все больше используется во всех сферах современного мира.

Среди очевидных преимуществ использования QR-кодов стоит отнести простоту и удобство в использовании – любой современный мобильный телефон позволяет мгновенно получить зашифрованную информацию из кода. Такие коды позволяют передавать любой объем данных и универсальны в использовании – информация может быть разного характера: детализированные изображения, видеоматериалы, презентации, комментарии от автора текста, пояснения и дополнения

от специалистов. То есть, код может заменять не только любую графическую информацию в тексте, но и любые сноски, словари используемых в тексте сокращений и обозначений и прочие элементы списков. Например, вступительные слова от авторов, традиционно размещаемые перед основным материалом, могут быть записаны в видеоформате и интегрированы в текст в виде QR-кода.

Отдельно стоит отметить и возможность интеграции QR-кода в список используемой литературы. Это может быть как один код, ведущий на весь список в электронном виде, так и код к каждому источнику, который позволит открыть по ссылке источник или откроет страницу сайта издательства, позволяющую приобрести нужную литературу.

Использование QR-кодов в учебных и учебно-научных публикациях – современное решение, которое может быть реализовано как в электронной версии, так и в печатной. Код занимает небольшой объем, что позволит одновременно существенно уменьшить объем публикации со значительным увеличением представленной информации. Такое решение, к примеру, может позволить не разбивать материал на несколько томов, а получать его в виде одного издания.

В настоящее время в образовательном процессе технология интеграции QR-кодов внедрена в учебниках истории: с 2023 для 11 классов [3], с 2024 – для 5-9 классов [4]. Как отмечают учителя, подобный подход позволяет ускорить учебный процесс и упрощает восприятие материала учениками.

В технике, химии и химической технологии ряд физических и химических процессов могут быть визуализированы лишь в виде компьютерных моделей. Технические объекты, например, промышленное оборудование, желательно представлять в объеме для возможности углубленного изучения принципа его работы и конструктивных особенностей отдельных элементов.

Применение подобных технологий рационально не только в технической литературе. Например, в одном из исследований QR-код описывается как один из наиболее актуальных средств креолизации учебных текстов, предоставляющий доступ к необходимым мультимедийным источникам и ресурсам: информационным блокам, мультимедиа-, аудио- и видеоматериалам, электронным библиотекам и прочему [5]. Таким образом, интеграция QR-кодов необходима или, по крайней мере, полезна в литературе практически всех областей современного образования и науки.

При изучении дисциплин специальности «Процессы и аппараты химической технологии» важно уделять большое внимание представлению отдельных элементов оборудования химической отрасли промышленности, подробному описанию химических, теплообменных, массообменных и прочих процессов. Также важно давать читателям и обучающимся информацию широкого круга – описывать как можно большее количество вариантов конструктивного исполнения определенных типов оборудования, режимных параметров эксплуатации на примерах различных технологических линий. Именно QR-код в учебной и научной литературе по процессам и аппаратам химической технологии может позволить наиболее доступно и просто изложить большой объем сложного и неоднородного материала данного направления.

Упрощение восприятия информации и возможность более глубокого ее изучения является актуальной задачей в современной педагогике и науке в целом, в том числе в области процессов и аппаратов химической технологии.

Экспериментальная часть

Для оценки потенциала интегрирования QR-кодов в литературу по процессам и аппаратам химической технологии рассмотрим в качестве учебного издания учебник для студентов среднего профессионального образования [6] (рис. 1).



Рисунок 1 - Обложка учебника [6]

В качестве научного издания рассмотрим монографию [7] (рис. 2).



Рисунок 2 - Обложка монографии [7]

Можно заметить, что в обоих изданиях представлено теплообменное оборудование. Если в учебнике [6] ему отведен лишь один из разделов, то монография [7] посвящена ему полностью.

Издания включают в себя описание различных типов теплообменного оборудования, их технические характеристики и особенности режимов эксплуатации, рекомендуемые области использования. Теплообменные аппараты – одна из неотъемлемых составляющих современной промышленности и быта, а также один из основных разделов в области процессов и аппаратов химической технологии. Такое оборудование используется на любых производственных объектах как в химической, так и в других отраслях промышленности. Спектр его применения включает подогрев рабочих сред, продуктов в технологических операциях, обогрев помещений, охлаждение

продуктов и оборудования в процессе производственной эксплуатации, охлаждение сточных вод предприятий и многое другое.

Графический материал по теплообменным аппаратам несет в себе три основных функции. Во-первых, дать общее представление о типах и конструкциях теплообменных аппаратов, для чего используются фотографии, иллюстрации и схематические изображения общего вида аппарата. Во-вторых, дать информацию об особенностях конкретной конструкции аппарата, детально показать отдельные его элементы, для чего используются фотографии и иллюстрации аппаратов и отдельных их элементов в разрезе, представляются схематические изображения отдельных элементов и узлов. В-третьих, объяснить и проиллюстрировать принцип работы аппарата, для чего используются изображения с графическими элементами, показывающими, например, траекторию движения рабочих сред, распределение их температуры, возникающие напряжения в конструкции аппарата.

Если в первом случае большая детализация изображений не столь важна (однако предпочтительна), то для понимания принципа функционирования аппарата изображения должны быть как можно более информативными.

При попытке представления изображений с описанными нами требованиями возникает ряд сложностей. Для описания аппарата с большим количеством элементов необходимо, соответственно, большое количество изображений. Некоторые публикации издаются с черно-белыми изображениями, что может приводить к сложности восприятия и искажению представленного исходного объекта.

На рис. 3 дан пример общего представления конкретной конструкции теплообменного оборудования из монографии [7], а именно – трубного пучка кожухотрубчатого теплообменного аппарата с U-образными теплообменными трубами.

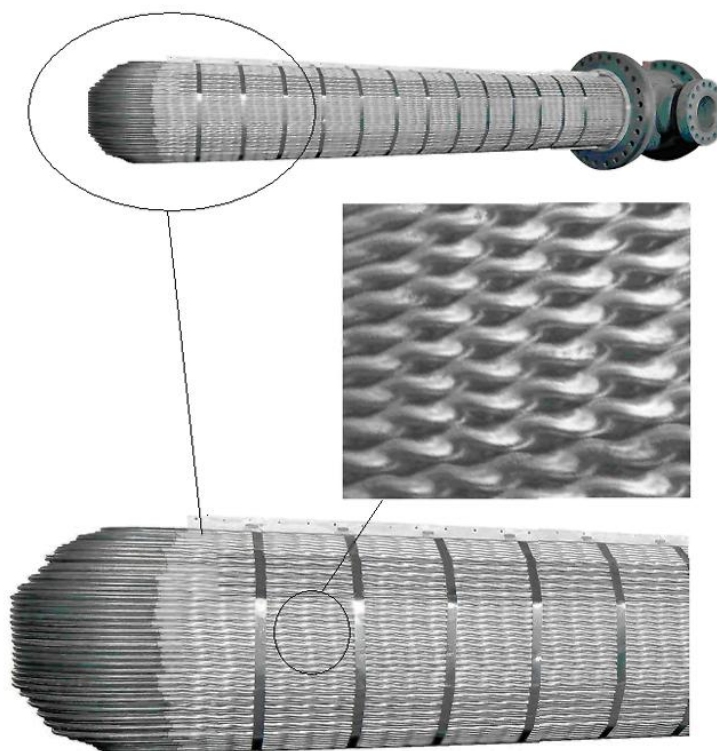


Рисунок 3 - Трубный пучок кожухотрубчатого теплообменного аппарата из монографии [7]

На рис. 4 представлен пример изображения принципа работы конкретной конструкции теплообменного аппарата из монографии [7], а именно – кожухотрубчатого теплообменного аппарата жесткой конструкции.

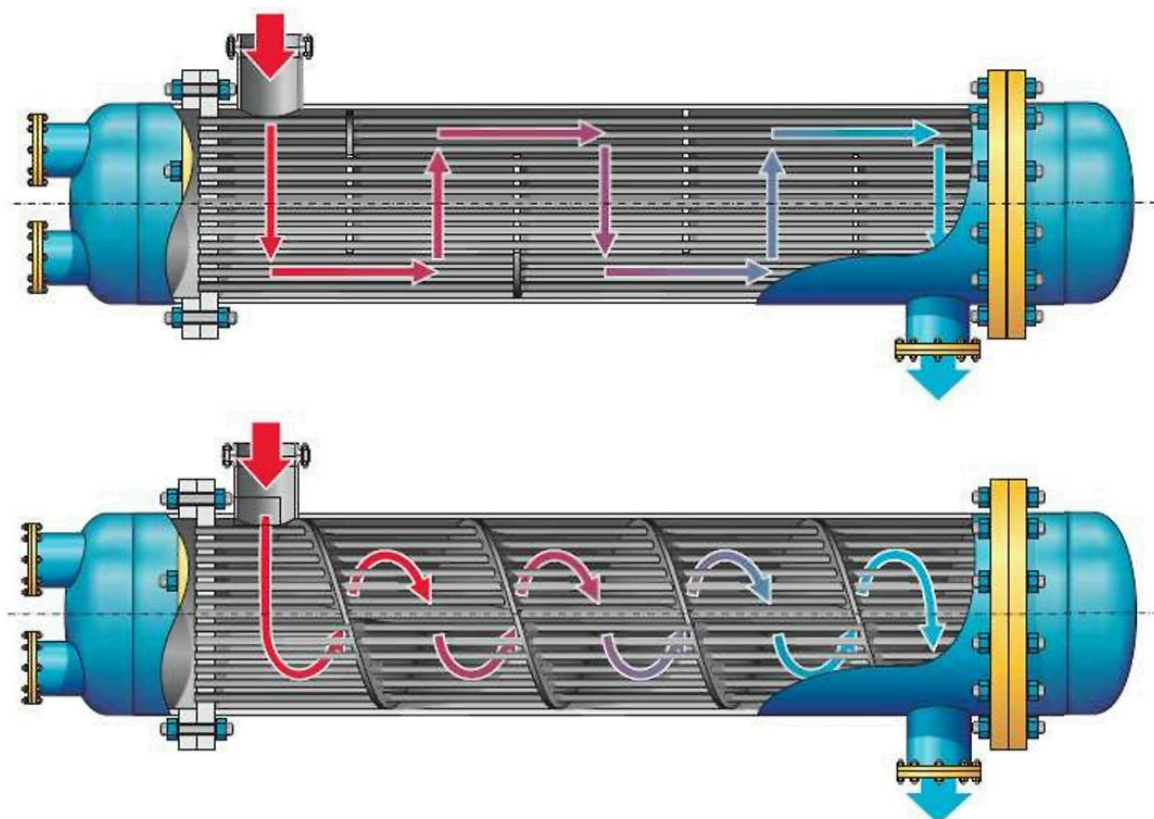


Рисунок 4 - Принцип работы кожухотрубчатого теплообменного аппарата из монографии [7].

На рис. 5 представлен пример изображения конструкции в разрезе (в разобранном виде) разборного пластинчатого теплообменного аппарата из учебника [6].

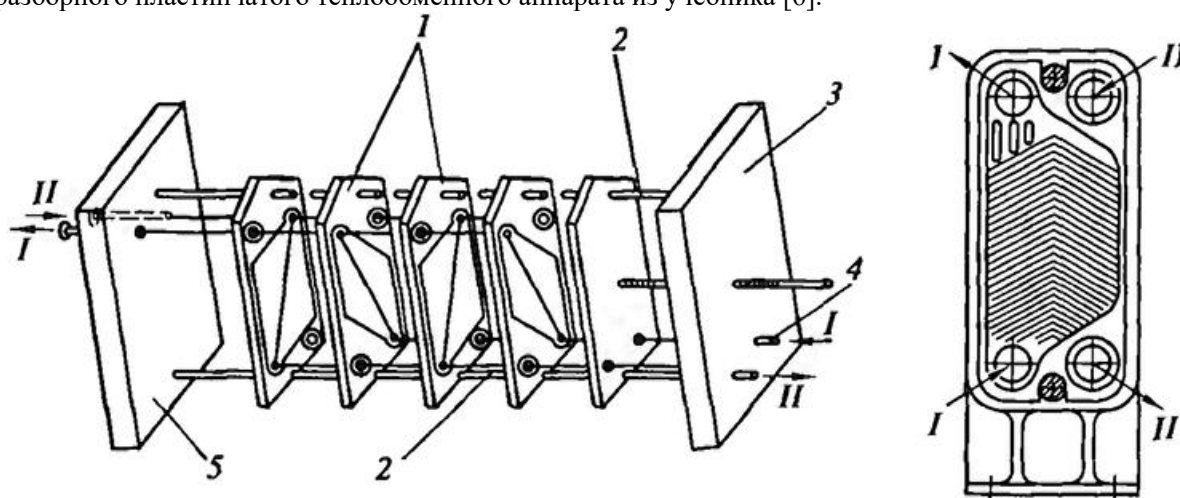


Рисунок 5 - Разборный пластинчатый теплообменный аппарат в разрезе (в разобранном виде) из учебника [6].

По представленным примерам графических материалов из рассмотренных учебного и научного изданий можно сделать ряд выводов.

В первую очередь, стоит отметить значимость дифференциации цвета в изображениях. На примере рис. 4 можно обратить внимание, что именно цветом показано постепенное изменение температуры потока теплоносителя по мере движения в кожухотрубчатом теплообменном аппарате. Так, красными стрелками отмечена высокая температура теплоносителя, а синим – низкая. Подобный подход значительно упрощает и ускоряет восприятие принципа работы оборудования.

Ещё одним важным критерием является высокая детализация изображений: как для общего вида аппарата или отдельного его элемента (на примере трубного пучка кожухотрубчатого

теплообменного аппарата на рис. 3), так и для схематических изображений (на примере рис. 4 и рис. 5).

Также стоит обратить внимание, что все представленные изображения не дают возможность в полном объеме рассмотреть и изучить теплообменные аппараты; такие изображения подходят для специалистов в данной области, но не для учащихся начальных курсов. Так, из рис. 3 для учащихся может быть неочевидно, что изображенные теплообменные трубки расположены именно U-образно, так как отсутствует вид сверху. Кроме того, могут возникнуть трудности с определением расположения теплообменных трубок относительно друг друга (расположены ли они на расстоянии друг от друга или соприкасаются), а также невозможно определить общее количество теплообменных трубок.

Все эти недостатки могут быть исключены путем внедрения QR-кодов в издания для интеграции не только качественных изображений, но и видео работы и принципа функционирования оборудования, комментариев специалистов по эксплуатации оборудования.

Заключение

Литература, используемая в изучении дисциплин специальности «Процессы и аппараты химической технологии», как и учебная и научная литература других отраслей, должна отвечать ряду требований. Однако специфика научной сферы ставит перед исследователями ряд проблем, которые связаны с изложением большого объема информации, техническими и типографическими ограничениями, а также с необходимостью модернизации учебных материалов.

Для решения этих задач могут быть использованы QR-коды, так как они позволяют шифровать и включать в структуру привычного для нас текста информацию разного формата: например, высококачественные изображения оборудования химической отрасли промышленности и отдельных его элементов, схемы различных химических, теплообменных, массообменных и прочих процессов, 3D-модели оборудования и конструкций, а также библиографические сноски, списки и ссылки на источники.

Проведенный анализ учебного и научного изданий показал высокий потенциал интеграции интерактивных технологий в литературе по процессам и аппаратам химической технологии. Наличие кодов с детальной информацией позволит избежать ошибок в изучении конкретных объектов, получить общее представление, что невозможно даже на практических занятиях (ввиду ограниченности лабораторного оснащения в учебных и научных учреждениях), а также существенно упростит изучение материала.

Список литературы

1. Валгина Н.С. Теория текста. М.: Логос. 2003. 173 с.
2. Дубовицкая Л.В. Функции QR-кодов на примере креолизованных текстов письменной коммуникации // Вестник Московского государственного областного университета. 2012. №3. С. 24–27.
3. Учителя положительно отзываються о новом едином учебнике истории [Электронный ресурс] // РИА Новости. — URL: <https://ria.ru/20230918/otsenka-1896918308.html> (дата обращения 10.02.2025).
4. Кравцов рассказал, когда подготовят новые учебники истории для 5-9 классов [Электронный ресурс] // РИА Новости. — URL: <https://ria.ru/20230807/uchebniki-1888704079.html> (дата обращения 10.02.2025).
5. Кузнецова Е.Г. Средства креолизации учебных текстов в методике преподавания русского языка как иностранного // Современные проблемы науки и образования. 2019. №2. С. 17-24.
6. Баранов Д.А., Кутепов А.М. Процессы и аппараты: Учебник для студ. учреждений сред. проф. образования. М.: Издательский центр «Академия». 2004. 304 с.
7. Попов И.А., Махьянов Х.М., Гуреев В.М. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена: Интенсификация теплообмена: монография. Под общ. ред. Гортышова Ю.Ф. Казань: Центр инновационных технологий. 2009. 560 с.

Научное издание

ПАХТ-2025

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ СЕМИНАР,
ПОСВЯЩЕННЫЙ 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
Ю. И. ДЫТНЕРСКОГО**

Материалы конференции

Текст репродуцирован с оригинала авторов

Подписано в печать 04. 04. 2025 г. Формат 60x84 1/8.
Усл. печ. л. 52,8 . Уч.-изд. л. 52,4. Тираж 100 экз. Заказ

Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева

Издательский центр

Адрес университета и Издательского центра
125047 г. Москва, Миусская пл., 9.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК