

АВТОМАТИЗАЦИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЕЙ ФАЗ В ТРЁХФАЗНОМ СЕПАРАТОРЕ С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗДЕЛЕНИЯ НЕФТИ, ГАЗА И ВОДЫ

БАКЛАНОВ Артем Андреевич

студен

Научный руководитель: ГИЛЬФАНОВ Камиль Хабибович

доктор технических наук, профессор

Казанский государственный энергетический университет

г. Казань, Россия

В работе представлен комплексный подход к повышению эффективности трехфазной сепарации. Для управления в сложных условиях проведён сравнительный анализ: классические ПИД-регуляторы (эффективно подавляют перерегулирование) сопоставлены с интеллектуальными системами на основе нечёткой логики и машинного обучения. Разработана архитектура АСУ, интегрирующая через OPC математические модели, ПЛК и SCADA. Показано, что максимальная эффективность достигается только при сочетании адаптивных алгоритмов управления (с онлайн-оптимизацией) и конструктивных усовершенствований оборудования, таких как наклонные перегородки.

Ключевые слова: трёхфазный сепаратор, автоматизация, регулирование уровня, ПИД-регулятор, имитационное моделирование, межфазный уровень, SCADA.

Эффективность промышленной подготовки нефти определяется качеством трёхфазной сепарации – разделения скважинной эмульсии на нефть, газ и воду. Процесс осложняется образованием эмульсий, пенообразованием и пульсациями входного потока (slug flow) [1, с. 10; 13, с. 5]. Ключевая задача управления – прецизионное поддержание межфазных уровней «газ-нефть» и «нефть-вода», отклонение которых приводит к снижению качества продукции согласно ГОСТ Р 51858-2002 и прямым экономическим потерям [14, с. 5].

Ввиду нелинейности и нестационарности сепаратора как объекта управления, разработка робастных адаптивных АСУ является критически важной задачей.

Горизонтальный трёхфазный сепаратор, например, типа НГСВ 1,6 - 3400 объемом 100 м³, представляет собой сложный гидродинамический объект, эффективность которого повышается за счет внутренних конструктивных элементов: коалесцирующих насадок для укрупнения капель эмульсии и перегородок для организации потоков [6, с. 42; 7, с. 22] (рисунок 1).

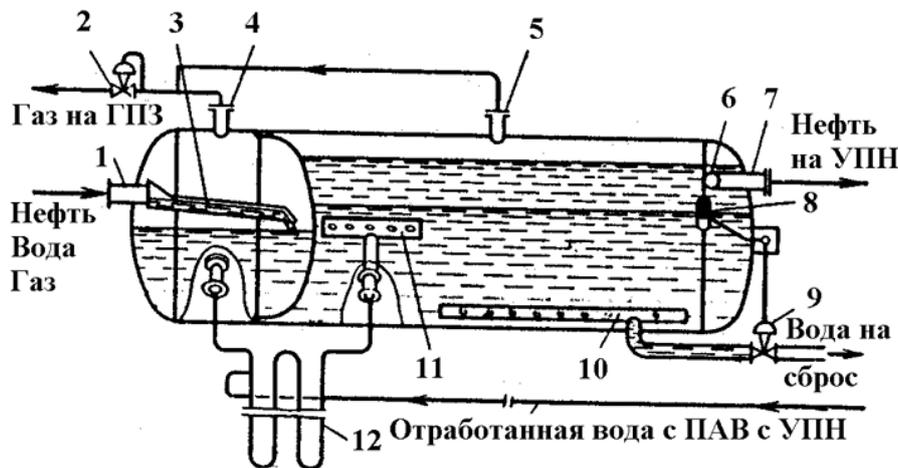


Рисунок 1. Трёхфазный сепаратор

Традиционное управление на базе ПИД-регуляторов неэффективно из-за нелинейности объекта: фиксированные настройки приводят к колебательным процессам при изменении режима [9, с. 1].

Перспективной альтернативой является применение нечёткой логики. Адаптивный нечёткий регулятор с сигмоидальными функциями принадлежности, уравнениями Сугено и последовательным обучением демонстрирует повышенную точность поддержания уровня в условиях неопределенности [9, с. 57, 64].

Фундаментом для синтеза АСУ служит имитационное моделирование (MATLAB/Simulink, UniSim Design), включающее описание геометрии, термодинамики (уравнение Peng-Robinson) и исполнительных механизмов [3, с. 17-23]. Линеаризация модели в рабочей точке (напр., уровень воды 1,7 м) позволяет применять классические методы синтеза (метод Циглера-Никольса), при этом сравнительный анализ показывает преимущество ПИД-алгоритмов над ПИ в подавлении перегуливания [11, с. 33, 38-39].

Для дальнейшей оптимизации применяются алгоритмы машинного обучения. Генетические алгоритмы в MATLAB используются для расчёта оптимальной уставки уровня, передаваемой на ПЛК Siemens через OPC-сервер, что повышает эффективность обезвоживания [12, р. 1-2]. Более сложный подход – обучение с подкреплением (RL). Алгоритм TD3 применяется как для офлайн-настройки ПИ-коэффициентов ($K_i=0.3926$, $K_p=5.9828$), так и для работы в режиме онлайн-контроллера, что повышает робастность

системы к возмущениям [10, р. 1, 15, 18].

Эффективность АСУ также зависит от конструкции аппарата. Установка наклонных перегородок улучшает гидродинамику и стабилизирует процесс. Прочностной анализ (SolidWorks) подтверждает механическую надёжность конструкции: максимальные напряжения (8,174 МПа) значительно ниже допустимых для стали 09Г2С (180,76 МПа) [5, с. 516-517].

Практическая реализация АСУ строится на трёхуровневой иерархии: полевой уровень (датчики РТ 5-1, ТТ 13-1 и др.), средний (ПЛК Siemens S7-313C) и верхний (АРМ оператора на базе SCADA-систем TIA Portal, WinCC) [2, с. 13; 9, с. 41].

Таким образом, анализ подтверждает неэффективность классических ПИД-регуляторов для управления нелинейным процессом трёхфазной сепарации. Оптимальное решение заключается в синергетическом объединении адекватного математического моделирования для синтеза алгоритмов, интеллектуальных систем управления (нечёткая логика, машинное обучение) для адаптации в реальном времени и конструктивной модернизации самого сепаратора для стабилизации гидродинамики. Реализация такого комплексного подхода на современной трёхуровневой архитектуре АСУ (ПЛК-SCADA) позволяет перейти от простого поддержания параметров к адаптивному управлению, что обеспечивает стабильно высокое качество разделения фаз, снижает эксплуатационные риски и повышает экономическую эффективность промышленной подготовки нефти.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Асмолов Д.С.* Автоматизированная система управления блоком сепарации установки комплексной подготовки нефти: выпускная квалификационная работа. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2021. – 49 с.
2. *Бақыт Ж.А.* Разработка автоматизированной системы управления процессом подготовки нефти: дипломный проект. – Алматы: Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, 2023. – 53 с.
3. *Барашкин Р.Л., Фролов О.Е., Южанин В.В., Нургуатова А.С.* Разработка системы управления и интерфейса оператора типового технологического процесса нефтегазовой отрасли с применением имитационного моделирования: учебное пособие. – М.: РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2020. – 55 с.
4. *Гильфанов К.Х., Гайнуллин Р.Н., Нгуен Т.* Энергосберегающая система отопления объектов электроэнергетики // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2020. – Т. 12. – № 1(45). – С. 46-53.
5. *Иванов А.Ю., Абрамов В.В., Никитин А.А., Серебренников Ю.Е., Кардаш А.А.* Повышение эффективности сепарации фаз с использованием наклонной перегородки // Известия ТулГУ.

Технические науки. – 2024. – Вып. 9. – С. 514-518.

6. *Кокарев А.А.* Разработка сепараторов установки комплексной подготовки природного газа и нефти: выпускная квалификационная работа. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2017. – 94 с.

7. *Купин А.С.* Разработка автоматизированной системы управления блоком сепарации установки комплексной подготовки нефти: выпускная квалификационная работа. – Томск: Томский политехнический университет, 2018. – 116 с.

8. *Попкова О.С., Файзуллина А.И., Гильфанов К.Х.* Определение параметров для эффективного горения малосернистого мазута // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 132. – С. 1267-1276.

9. *Хижняков Ю.Н., Никулин В.С., Сторожев С.А.* Адаптивный нечеткий подход к управлению уровнем нефти-сырца в сепараторе дожимной насосной станции // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 35. – С. 57-69.

10. *Ali A.A., Rashid M.T., Alhasnawi B.N., Bureš V., Mikulecký P.* Reinforcement-Learning-Based Level Controller for Separator Drum Unit in Refinery System // Mathematics. 2023. Vol. 11, no. 1746. P. 1-21.

11. *Fadaei M., Ameri M.J., Rafiei Y., Asghari M., Ghasemi M.* Experimental design and manufacturing of a smart control system for horizontal separator based on PID controller and integrated production model // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2024. Vol. 14. P. 2273-2295.

12. *Wu F., Huang K., Li H., Huang C.* Analysis and Research on the Automatic Control Systems of Oil-Water Baffles in Horizontal Three-Phase Separators // Processes. – 2022. Vol. 10, no. 1102. P. 1-13.

13. *Zelensky V.A., Zhmurov D.B., Shchodro A.I.* System of Automatic Control of Gas-Oil Separator Control the Density of the Oily Mixture // Samara State Aerospace University. 2016. P. 15-23.

14. *Zhenfeng Li, Yaqiao Li and Guangjun Wei* Optimization of Control Loops and Operating Parameters for Three-Phase Separators Used in Oilfield Central Processing Facilities // Fluid Dynamics & Materials Processing. 2022. P. 1-15.

AUTOMATION OF PHASE LEVEL REGULATION IN A THREE-PHASE SEPARATOR TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF OIL, GAS, AND WATER SEPARATION

BAKLANOV Artem Andreevich

Student

Scientific supervisor: **GILFANOV Kamil Habibovich**

Doctor of Sciences in Technology, Professor

Kazan State Power Engineering University

Kazan, Russia

The paper presents a comprehensive approach to improving the efficiency of three-phase separation. For process control under complex conditions, a comparative analysis was conducted: classical PID controllers (effective at suppressing overshoot) were compared with intelligent systems based on fuzzy logic and machine learning. A control system architecture was developed, integrating mathematical models, PLCs, and SCADA via OPC. It is shown that maximum efficiency is achieved only through a combination of adaptive control algorithms (with online optimization) and equipment design improvements, such as inclined baffles.

Keywords: three-phase separator, automation, level control, PID controller, simulation modeling, interface level, SCADA.