

Всероссийское СМИ

«Академия педагогических идей «НОВАЦИЯ»

Свидетельство о регистрации Эл №ФС 77-62011 от 05.06.2015 г.

(выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций)

Сайт: [akademnova.ru](http://akademnova.ru)

e-mail: [akademnova@mail.ru](mailto:akademnova@mail.ru)

*Прощекальников А.Д. Оптимизация системы теплообмена в химико-технологических процессах на основе «задачи о назначениях»// Академия педагогических идей «Новация». Серия: Студенческий научный вестник. – 2020. – №6 (июнь). – АРТ 87-эл. – 0,2 п.л. - URL: <http://akademnova.ru/page/875550>*

**РУБРИКА: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

**681.5 УДК**

**Прощекальников Артем Дмитриевич,**

студент 2 курса магистратуры, факультет управления и автоматизации

*Научный руководитель:* Волкова М.М., к.т.н., доцент

ФБГОУ ВО «Казанский национальный

исследовательский технологический университет»

г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: [artemonofficial@mail.ru](mailto:artemonofficial@mail.ru)

**ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ТЕПЛООБМЕНА В ХИМИКО-  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ НА ОСНОВЕ  
«ЗАДАЧИ О НАЗНАЧЕНИЯХ»**

*Аннотация:* В статье рассматривается метод решения задачи синтеза оптимальной структуры системы теплообмена, основанный на задаче "о назначениях", отражены основные моменты в расчетах теплообменных аппаратов.

*Ключевые слова:* Оптимизация, тепловая интеграция, задача о назначениях.

Всероссийское СМИ

«Академия педагогических идей «НОВАЦИЯ»

Свидетельство о регистрации Эл №ФС 77-62011 от 05.06.2015 г.

(выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций)

Сайт: [akademnova.ru](http://akademnova.ru)

e-mail: [akademnova@mail.ru](mailto:akademnova@mail.ru)

**Proshchekalnikov Artem Dmitrievich,**  
student 2 course of magistracy, Faculties Control and Automation  
*Supervisor:* Volkova M.M., PhD, Associate Professor  
FGBOU VO "Kazan National Research Technological University"  
Kazan, Russian Federation

## OPTIMIZATION OF THE HEAT EXCHANGE SYSTEM IN CHEMICAL AND TECHNOLOGICAL PROCESSES BASED ON «TASKS OF APPOINTMENTS»

*Abstract:* The article discusses a method for solving the problem of synthesizing the optimal structure of a heat exchange system based on the «appointment» problem, reflects the main points in the calculations of heat exchangers.

*Key words:* Optimization, thermal integration, assignment tasks.

В последнее время в отечественной промышленности все чаще акцентируется внимание на энергосбережении. Обусловлено это постоянным увеличением стоимости энергоносителей и ужесточением экологических норм. Уменьшение энергопотребления позволяет снизить себестоимость продукции за счет уменьшения в первую очередь эксплуатационных затрат, тем самым повышается рентабельность и экологичность производства. Основным потенциалом экономии энергоносителей скрывается в самом технологическом процессе, а особенно в схеме рекуперации тепла. Вследствие этого, возникает актуальность проблемы снижения энергозатрат и разрабатываются новые методы и подходы для решения данной проблемы. Одним из наиболее эффективных подходов к энергосбережению в технологических системах, характеризующихся множеством внутренних

Всероссийское СМИ

«Академия педагогических идей «НОВАЦИЯ»

Свидетельство о регистрации Эл №ФС 77-62011 от 05.06.2015 г.

(выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций)

Сайт: [akademnova.ru](http://akademnova.ru)

e-mail: [akademnova@mail.ru](mailto:akademnova@mail.ru)

источников и потребителей тепла, является теплоинтеграция материально-энергетических потоков. Данный метод позволяет сэкономить до 80% потребляемых энергоресурсов. В связи с нарастающими темпами развития химической технологии и системотехники задача оптимальной тепловой интеграции за более чем пятидесятилетнюю историю приобрела большую актуальность, чем привлекла внимание специалистов как в России, так и за рубежом[1].

Данная проблема формулируется как задача математического программирования и является сложной комбинаторной задачей дискретно-нелинейного программирования, которой, как следствие, присуща еще и многоэкстремальность. Для решения этой задачи наиболее эффективными являются методы, основанные на декомпозиции суперструктур, представляющих собой объединение всех возможных вариантов организации систем теплообмена. На первом этапе проводится поиск и оптимизация структурно связанных аппаратов, осуществляющих охлаждение «горячего» и нагревание «холодного» потоков до заданных температур, либо съём или передачу необходимого количества тепла при фазовых переходах. На втором этапе решением задачи линейного дискретного программирования «о назначениях» находится структура одностадийной системы теплообмена[2].

Задача оптимальной теплоинтеграции - поиск минимального значения критерия оптимизации (сумма капитальных и эксплуатационных затрат) при заданной структуре технологических связей между элементами ХТС с учетом ограничений или технологических условий функционирования аппаратов ХТС.

В традиционной постановке задача внедрения оптимальной теплоинтеграции формулируется следующим образом. Имеется  $M$  "горячих" и  $N$  "холодных" технологических потоков. Горячие потоки - это потоки, отдающие тепло, а холодные - принимающие тепло.

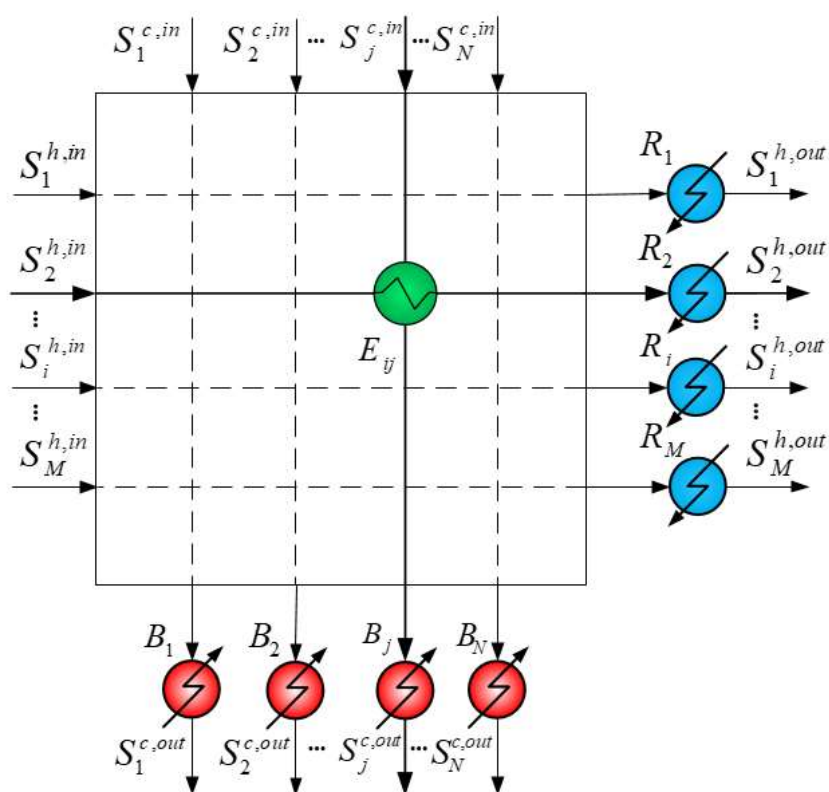


Рисунок 1 - Система одностадийного теплообмена

Для каждого из этих потоков заданы начальные и конечные температуры,  $(T_i^{h,in}, T_i^{h,out}, T_j^{c,in}, T_j^{c,out})$  где индексы  $h$  и  $c$  относят соответствующую величину к горячему и холодному потокам. Здесь  $i=1,2,\dots,M$ ;  $j=1,2,\dots,N$ . Для охлаждения или нагрева этих потоков используют внешние хладагенты  $R_i$  и теплоносители  $B_j$ , в основном это холодная вода и водяной пар. Смысл задачи оптимальной теплоинтеграции заключается в реализации рекуперативного теплообмена между горячими и холодными

потоками с помощью теплообменников (рекуператоров). В качестве критерия оптимизации предлагается использовать приведенные суммарные капитальные и эксплуатационные затраты:

$$C = \frac{1}{y} (z_{reb} + z_{con} + z_{he}) + h(Z_{con} + Z_{reb}) \quad (1)$$

где  $C$  - приведенные годовые затраты, руб/год;  $y$  - срок окупаемости, год;  $z_{he}$ ,  $z_{reb}$ ,  $z_{con}$  - стоимость рекуператора, нагревателя и холодильника, руб.;  $h$  - время работы системы, ч/год;  $Z_{reb}$ ,  $Z_{con}$  - стоимость теплоагента и хладагента, руб./ч[3].

Расчет стоимости теплообменных аппаратов производится исходя из зависимости стоимости от поверхности теплообмена:  $z(n) = aA^y$ , где  $a$  - стоимостной коэффициент;  $A$  - площадь поверхности теплообмена в теплообменнике, м<sup>2</sup>. Площадь поверхности теплообмена рассчитывается исходя из уравнения теплового баланса:

$$A_n = \Delta Q_n / (U_n \Delta t_{ln}) \quad (2)$$

где  $\Delta Q_n$  - количество теплоты, передаваемой в теплообменнике за единицу времени, кВт;  $U_n$  - коэффициент теплопередачи, кВт/м<sup>2</sup>;  $\Delta t_{ln}$  - среднелогарифмическая разность температур на концах теплообменника[4];

Для вычисления затрат на внешние энергоносители используют следующие соотношения:

$$Z_{reb} = F^{hu} c^{hu} \quad (3)$$

$$Z_{con} = F^{cu} c^{cu} \quad (4)$$

где  $F^{cu}$ ,  $F^{hu}$  - массовые расходы внешних энергоносителей, кг/ч;  $C^{hu}$ ,  $C^{cu}$  - стоимость энергоносителей, руб./кг.

Таким образом, задача синтеза оптимальной системы теплообмена состоит в поиске такой структуры, при которой суммарные приведенные капитальные и эксплуатационные затраты будут принимать минимальное значение.

Данная задача поиска оптимальной структуры системы теплообмена решается с помощью «задачи о назначениях». Цель классической задачи о назначениях и ее многочисленных вариаций найти оптимальные пары "агент-задача". Каждую задачу может выполнять только один агент, при этом каждый агент может выполнять только одну задачу[5]. Математическая формулировка задачи о назначениях выглядит следующим образом:

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} ,$$

при условиях

$$\sum_{j \in J} r_{ij} x_{ij} \geq b_i , \text{ для всех } i \in I \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = 1 , \text{ для всех } j \in J \quad (6)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ или } 1,$$

где  $I = \{1, 2, \dots, m\}$  - количество агентов,  $J = \{1, 2, \dots, n\}$  - количество задач,  $C_{ij}$

- стоимость, учитываемая в случае, когда агент  $i$  выполняет задачу  $j$ ,  $r_{ij}$  - количество ресурсов, затрачиваемых агентом  $i$  для выполнения задачи  $j$  и  $b_i > 0$  - количество ресурсов, доступных агенту  $i$ . Переменная  $x_{ij}$  может быть

истолкована следующим образом:

$x_{ij}=1$ , если агент  $i$  выполняет задачу  $j$ ,

$x_{ij}=0$ , в противном случае;

Поисковыми переменными этой задачи являются элементы матрицы назначений, которые указывают между какими горячими и холодными потоками должен быть организован рекуперативный теплообмен. Таким образом, с помощью данного метода будет проводиться поиск и оптимизация структурно-связанных аппаратов, осуществляющих охлаждение горячего и нагревание холодного потоков до заданных температур.

Для формализации задачи нахождения оптимальных экономических оценок на организацию теплообмена каждой совокупности пар технологических потоков выделяется некая суперструктура теплообменных аппаратов, содержащая ряд простых структур – элементарных блоков системы теплообмена (ЭБСТ). Под ЭБСТ понимается структурная единица, позволяющая осуществить передачу некоторого количества теплоты  $\Delta Q_j^c$   $j$ -му холодному потоку и отбор некоторого количества теплоты  $\Delta Q_i^h$  от  $i$ -го горячего потока[5]. Приведенная на рисунке 2 суперструктура ЭБСТ включает рекуперативный теплообменник  $E_{ij}$ , нагреватель  $B_j$  и холодильник  $C_i$ .

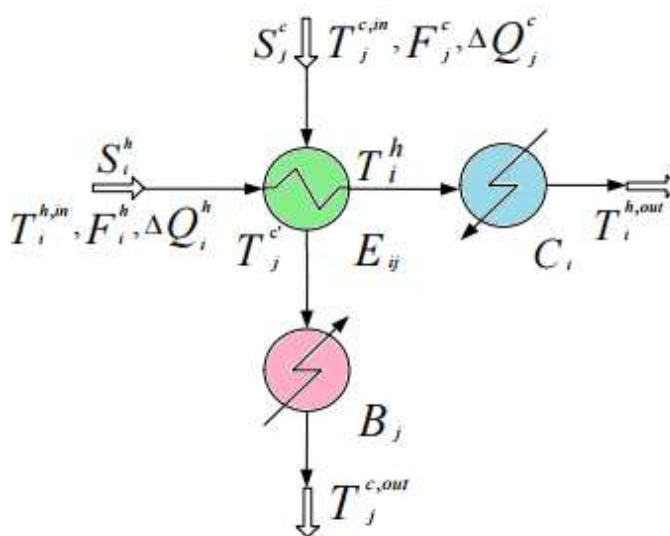


Рисунок 2 – Суперструктура ЭБСТ

Постановка задачи оптимизации блока ЭБСТ выглядит следующим образом:

$$f_{ij}^{\text{opt}} = \min_{A_{ij}, A_i, A_j, F_i^{\text{cu}}, F_j^{\text{hu}}} (\hat{m}^{\text{he}} A_{ij}^{\gamma^{\text{he}}} + \hat{m}^{\text{col}} A_i^{\gamma^{\text{col}}} + \tilde{m}^{\text{cu}} F_i^{\text{cu}} + \hat{m}^{\text{reb}} A_j^{\gamma^{\text{reb}}} + \tilde{m}^{\text{hu}} F_j^{\text{hu}}) \quad (7)$$

$$\varphi^{\text{he}}(T_i^{\text{h,in}}, T_j^{\text{c,in}}, T_i^{\text{h}}, T_j^{\text{c}}, A_{ij}, F_i^{\text{h}}, F_j^{\text{c}}, U) = 0, \quad (8)$$

$$\varphi^{\text{col}}(T_i^{\text{h}}, T_j^{\text{cu,in}}, T_i^{\text{h,out}}, T_j^{\text{cu,out}}, A_i, F_i^{\text{h}}, F_j^{\text{cu}}, U) = 0, \quad (9)$$

$$\varphi^{\text{reb}}(T_j^{\text{hu,in}}, T_j^{\text{c}}, T_j^{\text{hu,out}}, T_j^{\text{c,out}}, A_j, F_j^{\text{hu}}, F_j^{\text{c}}, U) = 0, \quad (10)$$

$$\Delta Q_i^{\text{he}} \geq 0, \Delta Q_i^{\text{col}} \geq 0, \Delta Q_j^{\text{reb}} \geq 0, \quad (11)$$

$$\Delta t_1 \geq \xi, \Delta t_2 \geq \xi, \Delta t_3 \geq \xi, \Delta t_4 \geq \xi, \Delta t_5 \geq \xi, \Delta t_6 \geq \xi. \quad (12)$$

где  $\hat{m}^{\text{he}}, \hat{m}^{\text{col}}, \hat{m}^{\text{reb}}$  - ценовые коэффициенты для вычисления капитальных затрат рекуперативного теплообменника, холодильника и кипятильника, соответственно;  $\gamma^{\text{he}}, \gamma^{\text{col}}, \gamma^{\text{reb}}$  - корреляционные коэффициенты;  $\tilde{m}^{\text{cu}}, \tilde{m}^{\text{hu}}$  - стоимость единицы расхода «горячего» и «холодного» теплоносителя.



На втором этапе решением задачи линейного программирования о назначениях определяется структура оптимальной системы теплообмена (СТО) [5]. Для этого введем двоичную переменную  $z_{ij}$ :

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ необходимо организовать теплообмен между горячим потоком } S_i^h \\ \text{и холодным потоком } S_j^c \text{ с помощью рекуперативного теплообменника,} \\ \text{либо горячий поток охлаждается с помощью холодильника и холодный поток} \\ \text{нагревается с помощью нагревателя;} \\ 0, \text{ либо оба потока } (S_i^h, S_j^c) \text{ обмениваются теплом с другими потоками, либо} \\ \text{один из потоков } (S_i^h, S_j^c) \text{ обменивается теплом с одним из других потоков, а} \\ \text{другой автономно нагревается (охлаждается).} \end{cases}$$

Под автономным нагревом (охлаждением) подразумеваются блоки без рекуперативного теплообменника.

Таким образом, задача о назначениях в случае, когда  $M < N$  принимает вид:

$$\begin{aligned} \min_{z_{ij}} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f_{ij}^{opt} z_{ij}, \\ \sum_{i=1}^M z_{ij} \leq 1, \sum_{j=1}^N z_{ij} = 1 \end{aligned} \quad (13)$$

И в случае  $M > N$  будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} \min_{z_{ij}} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f_{ij}^{opt} z_{ij}, \\ \sum_{i=1}^M z_{ij} = 1, \sum_{j=1}^N z_{ij} \leq 1 \end{aligned} \quad (14)$$

Важно отметить, что наличие неравенств в ограничениях задачи сужает область поиска оптимальной СТО, т.к. в решении задачи не учитываются оценки на автономный теплообмен  $|M - N|$  потоков. В этом случае, когда число «горячих» потоков не равно числу «холодных» потоков, матрицу оценок

**Всероссийское СМИ**

**«Академия педагогических идей «НОВАЦИЯ»**

Свидетельство о регистрации Эл №ФС 77-62011 от 05.06.2015 г.

(выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций)

Сайт: [akademnova.ru](http://akademnova.ru)

e-mail: [akademnova@mail.ru](mailto:akademnova@mail.ru)

задачи «о назначениях» предлагается достраивать до квадратного вида путем добавления  $|M - N|$  строк (столбцов) дополнительных оценок на автономный теплообмен, т.е. теплообмен целевого потока с внешним теплоносителем.

На рисунках 3 и 4 представлены примеры матрицы оценок (сумма приведенных капитальных и эксплуатационных затрат для каждой пары потоков) и матрицы назначений соответственно. Для учета в критерии задачи экономических оценок на автономное охлаждение горячих потоков, матрица оценок была преобразована до квадратичного вида. Были добавлены псевдопотоки, представляющие собой экономические оценки на автономное охлаждение горячих потоков. Такое преобразование необходимо для расширения поиска области оптимальной системы теплообмена.

	Куб К-6-1	Куб К-12	Куб К-1	Куб К-7	Куб К-27	Куб К-41	s33									
Верх К-18	2 733 489	303 500	1 936 658	2 783 778	346 395	52 497	39 849	7 975	7 975	7 975	7 975	7 975	7 975	7 975	7 975	7 975
Верх К-3	3 817 288	1 324 878	2 999 519	3 886 639	1 429 255	3 063 373	1 302 710	1 091 795	1 091 795	1 091 795	1 091 795	1 091 795	1 091 795	1 091 795	1 091 795	1 091 795
Верх К-7	4 146 362	1 349 862	3 328 592	4 395 712	1 758 328	3 421 917	1 431 783	1 420 868	1 420 868	1 420 868	1 420 868	1 420 868	1 420 868	1 420 868	1 420 868	1 420 868
Верх К-14	3 728 789	1 295 864	2 921 018	3 776 139	1 340 755	3 046 818	1 014 209	1 005 294	1 005 294	1 005 294	1 005 294	1 005 294	1 005 294	1 005 294	1 005 294	1 005 294
Верх К-25	1 703 125	39 528	1 039 828	1 845 040	39 083	46 174	47 011	46 802	46 802	46 802	46 802	46 802	46 802	46 802	46 802	46 802
Верх К-27	3 110 967	678 042	2 259 196	3 160 317	722 933	428 996	396 387	385 472	385 472	385 472	385 472	385 472	385 472	385 472	385 472	385 472
Верх К-36	2 629 649	241 721	1 854 769	2 664 071	286 226	4 129	4 294	4 051	4 051	4 051	4 051	4 051	4 051	4 051	4 051	4 051
Верх К-41	2 841 825	408 900	3 759 862	2 891 175	453 793	74 527	127 246	116 331	116 331	116 331	116 331	116 331	116 331	116 331	116 331	116 331
Верх К-47	2 756 498	323 573	1 938 728	2 805 848	368 464	46 529	46 215	31 004	31 004	31 004	31 004	31 004	31 004	31 004	31 004	31 004
s8	2 769 795	135 541	1 810 169	2 594 051	185 985	37 471	45 915	35 300	35 300	35 300	35 300	35 300	35 300	35 300	35 300	35 300
s43	2 725 840	244 487	1 918 197	2 728 823	320 570	49 302	12 332	11 931	11 931	11 931	11 931	11 931	11 931	11 931	11 931	11 931
s59	2 682 437	252 690	1 870 845	2 680 885	304 124	12 080	2 757	4 948	4 948	4 948	4 948	4 948	4 948	4 948	4 948	4 948
s60	2 383 595	251 929	1 889 145	2 679 851	296 703	1 377	3 250	3 300	3 300	3 300	3 300	3 300	3 300	3 300	3 300	3 300
	2 725 494	292 569	1 907 734	2 774 644	397 461	43 523	10 915									

Псевдопотоки

Рисунок 3 – Сумма приведенных капитальных и эксплуатационных затрат для каждой пары потоков

	Куб К-6-1	Куб К-12	Куб К-1	Куб К-7	Куб К-27	Куб К-41	s33									
Верх К-18-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Верх К-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Верх К-6-2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Верх К-14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Верх К-19	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Верх К-27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Верх К-36	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Верх К-41	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Верх К-47	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
s8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s43	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
s59	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
s60	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Рисунок 4 – Матрица назначений

Всероссийское СМИ

«Академия педагогических идей «НОВАЦИЯ»

Свидетельство о регистрации Эл №ФС 77-62011 от 05.06.2015 г.

(выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций)

Сайт: [akademnova.ru](http://akademnova.ru)

e-mail: [akademnova@mail.ru](mailto:akademnova@mail.ru)

Рассмотренные подход и алгоритм синтеза оптимальных СТО на основе задачи о назначениях обладают рядом преимуществ по сравнению с подходами, основанными на эвристических правилах. Вследствие того, что используются строгие математические модели теплообменников и точные методы расчета фазового равновесия и энтальпии, позволяет отступить от допущений на постоянство состава фаз и удельной теплоемкости. В общем виде задача синтеза оптимальной СТО может быть представлена как сложная задача дискретно-непрерывного нелинейного программирования. Ее разделение на два этапа позволяет учесть дискретность в конструктивных параметрах теплообменников при решении задачи оптимизации на первом этапе, а также топологическую дискретность при ее сведении на втором этапе к задаче о назначениях. Оценка затрат на транспортировку, трубопроводы, различный материал теплообменников, стоимость монтажа и обвязки системы КИПиА могут быть учтены при формировании элементов матрицы оценок. Еще одним преимуществом предлагаемого алгоритма является его универсальность к решению задач проектирования и реконструкции химико-технологических систем. При определении экономической оценки на теплообмен в ЭБСТ могут рассматриваться несколько альтернативных структур, а значит при решении задачи реконструкции в множество возможных ЭБСТ могут входить также блоки существующей установки. В случае, когда теплообмен между двумя потоками нежелателен, стоимость ЭБСТ может быть найдена как сумма оценок на автономный теплообмен потоков.

**Всероссийское СМИ**

**«Академия педагогических идей «НОВАЦИЯ»**

Свидетельство о регистрации Эл №ФС 77-62011 от 05.06.2015 г.

(выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций)

**Сайт:** [akademnova.ru](http://akademnova.ru)

**e-mail:** [akademnova@mail.ru](mailto:akademnova@mail.ru)

### **Список использованной литературы:**

1. Петлюк Ф.Б. Многокомпонентная ректификация: теория и расчет. // М.: Химия, 1983. 304 с.
2. Островский Г. М. Оптимизация технических систем / Г.М. Островский, Н. Н. Зиятдинов, Т. В. Лаптева. – М.: КНОРУС, 2012. – 432 с.
3. Бояринов А. И., Кафаров В. В. Методы оптимизации в химической технологии. М.: Химия. – 1969. - 564 с.
4. Жулаев С. В. Пинч-анализ и оптимизация промышленных объектов // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – № 2. – С. 392–398.
5. Синтез оптимальных систем простых ректификационных колонн с рекуперацией тепла 2015 г. Г. М. Островский, Н. Н. Зиятдинов, И. И. Емельянов // Доклады академии наук, 2015, том 461, № 2, с. 189-192.

***Дата поступления в редакцию: 26.06.2020 г.***

***Опубликовано: 26.06.2020 г.***

***© Академия педагогических идей «Новация». Серия «Студенческий научный вестник», электронный журнал, 2020***

***© Прощекальников А.Д., 2020***