

Э. А. Исхаков, Р. Ф. Калимуллин, И. И. Емельянов,
А. С. Сильвестрова, Н. Н. Зиятдинов

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА УСТАНОВОК ГИДРОКРЕКИНГА И ГИДРООЧИСТКИ

Ключевые слова: гидрокрекинг, гидроочистка, тепловая интеграция, синтез систем, пинч-анализ, компьютерное моделирование, оптимизация, энергосбережение, системная инженерия.

Рассматривается задача синтеза оптимальных систем рекуперативного теплообмена, а также преимущества и недостатки современных методов ее решения. Приводятся формализованные постановки составляющих оптимизационных задач строгого декомпозиционного алгоритма. Исходная задача дискретно-непрерывного нелинейного математического программирования разбивается на последовательность трех локальных задач: линейного программирования для минимизации суммарных приведенных операционных затрат, смешанного целочисленного программирования с целью минимизации числа теплообменного оборудования, нелинейного программирования для минимизации приведенных капитальных затрат путем построения гипотетически обобщенной модели системы теплообмена. На разработанных в среде универсально-моделирующего пакета Aspen HYSYS строгих компьютерных моделях технологических установок гидроочистки тяжелого газойля коксового и гидрокрекинга исследуются источники и стоки тепловой энергии. На основе рассчитанных параметров горячих и холодных технологических потоков методом пинч-анализа проводится оценка энергоэффективности и приводятся рассчитанные показатели потенциала для энергосбережения. Полученные результаты анализа характеризуют низкую энергетическую эффективность исследуемых систем и являются предпосылкой для решения задачи синтеза. С использованием декомпозиционного алгоритма решается задача проектирования оптимальных систем теплообмена исследуемых установок. Показывается, что полученное решение значительно превосходит по критерию суммарных приведенных капитальных и эксплуатационных затрат существующий вариант организации системы теплообмена, что характеризует высокую эффективность исследуемого метода и практическую значимость полученных результатов. Синтезированные системы теплообмена позволяют рекуперировать 99,2-99,8% от предельно возможного количества тепловой энергии, что удовлетворяет и энергетическому критерию. В завершении обсуждаются вопросы дальнейшего совершенствования современных методов синтеза систем теплообмена и крупномасштабной тепловой интеграции.

E. A. Iskhakov, R. F. Kalimullin, I. I. Emelyanov,
A. S. Silvestrova, N. N. Ziyatdinov

SYNTHESIS OF OPTIMAL SYSTEM OF RECUPERATIVE HEAT EXCHANGE OF HYDROCRACKING AND HYDROTREATING UNITS

Keywords: hydrocracking, hydrotreating, heat integration, systems synthesis, pinch analysis, simulation, optimization, energy saving, process systems engineering.

The problem of synthesis of optimal recuperative heat exchange systems is considered, as well as advantages and disadvantages of modern methods of its solution. Formalized formulations of the components of optimization problems of a strict decomposition algorithm are given. The initial problem of discrete-continuous nonlinear mathematical programming is divided into a sequence of three local problems: linear programming to minimize the total reduced operating costs, mixed integer programming to minimize the number of heat exchange equipment, nonlinear programming to minimize the reduced capital costs by constructing a hypothetically generalized model of the heat exchange system. On the developed in the environment of the universal modelling package Aspen HYSYS rigorous computer models of the process units of hydrotreating of heavy gas oil of coking and hydrocracking are investigated sources and drains of heat energy. Based on the calculated parameters of hot and cold process streams, energy efficiency is assessed by pinch analysis and calculated energy saving potential indicators are presented. The obtained analysis results characterize the low energy efficiency of the investigated systems and are a prerequisite for solving the synthesis problem. Using a decomposition algorithm, the problem of designing optimal heat exchanger network of the investigated plants is solved. It is shown that the obtained solution significantly exceeds the existing variant of the heat exchange system organization by the criterion of total reduced capital and operating costs, which characterizes the high efficiency of the investigated method and the practical significance of the obtained results. The synthesized heat exchange systems allow to recover 99.2-99.8% of the maximum possible amount of heat energy, which also satisfies the energy criterion. In conclusion, the issues of further improvement of modern methods of synthesis of heat exchange systems and large-scale heat integration are discussed.

Обзор методов решения задачи оптимальной тепловой интеграции

Решение задачи синтеза оптимальных систем рекуперативного теплообмена позволяет значительно снизить затраты на организацию и функционирование установок химической, нефтегазохимической, нефтегазохимической и биохимической промышлен-

ности. Под синтезом оптимальных систем рекуперативного теплообмена понимается задача поиска оптимальной технологической схемы передачи тепла от горячих технологических потоков холодным, а также режимов работы устанавливаемого теплообменного оборудования, при которых суммарные приведенные капитальные и операционные затраты принимают минимальное значение. Иначе говоря, задача

синтеза состоит в поиске экстремальной точки, являющейся компромиссом между инвестициями, коммунальными платежами за потоки энергоносителей и числом единиц монтируемого технологического оборудования. Сложный комбинаторный характер проблемы синтеза, нелинейность математического описания процессов теплообмена, наличие множества

экстремумов критерия оптимальности, делает по сегодняшний день проблему синтеза открытой, актуальной для разработки эффективных алгоритмов решения. К настоящему времени разработано множество методик синтеза (рис. 1), среди которых можно выделить две основные группы: термодинамические подходы и алгоритмические методы [1-3].

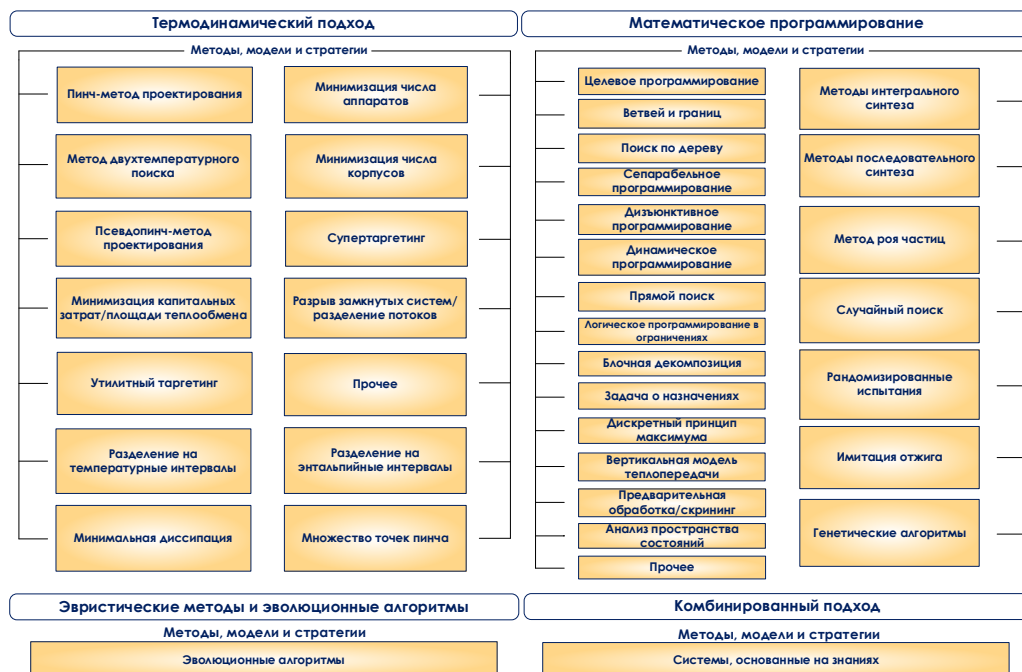


Рис. 1 – Подходы, алгоритмы и технологии решения задачи оптимальной тепловой интеграции

Fig. 1 – Approaches, algorithms and technologies for solving the problem of optimal thermal integration

Метод пинча-проектирования [4] основанный на законах термодинамики, активно используется при исследовании термодинамической эффективности существующих химико-технологических систем, а также в проектировании новых и модернизации старых производств. В основе метода лежит построение системных характеристик – горячего и холодного температурно-энтальпийного профилей по множеству потоков исследуемой системы. Метод пинч-проектирования получил развитие в методе двухтемпературного поиска [5], методе псевдопинча [6], технологиях утилитного таргетинга [7], супертаргетинга [8]. Методы, основанные на пинч-технологии, достаточно хорошо проработаны, но, к сожалению, не гарантируют получение экономически оптимального решения и могут привести к переизбытку аппаратов.

Алгоритмические методы требуют формализации задачи в виде моделей линейного, нелинейного, смешанного линейного и нелинейного программирования. Существующие алгоритмические методы можно разделить на детерминированные и стохастические [9-10]. К сожалению детерминированные алгоритмы [11-12] обладают существенным недостатком: крайне высокой вычислительной сложностью в получении глобального решения при экспоненциальном росте размерности задачи. Метод интегрального синтеза [13] основан на сведении исходной задачи смешанного программирования к задаче нелинейного

программирования гипотетически обобщенной, избыточной модели системы теплообмена – суперструктуры. Суперструктура включает в себя все возможные варианты синтезируемой системы, в последующем из которой определяется оптимальный вариант. Для построения суперструктуры используется виртуальный делитель потока с одним входом и несколькими выходами. Количество выходов виртуального делителя равно числу элементов схемы, к которым может быть подключен исходный элемент. Доля потока, передаваемого от одного элемента к другому, определяется структурным параметром, который является поисковой переменной. К сожалению, предложенные модели интегрального синтеза являются сильно нелинейными и невыпуклыми. Декомпозиционные алгоритмы, предложенные в работах [14-15] дают неплохие результаты, однако, отсутствие одновременного учета трехсторонних затрат приводит к получению неоптимальных решений.

Для устранения описанных недостатков в работах [16-19] была предложена комбинированная интегрально-декомпозиционная модель, основанная на структурной и целевой декомпозиции и сочетающая в себе преимущества описанных алгоритмов. В более поздних работах модель была расширена для многостадийных систем теплообмена [20] и систем с деляниями тепловых потоков [21], а также применена для

решения ряда задач синтеза систем теплообмена реальных технологических установок [22-23]. Предложенный вариант декомпозиции суперструктуры на задачи малой размерности позволил рассмотреть возможность применения методов оптимального проектирования с учетом неопределенности [24].

Стохастические алгоритмы являются более гибкими и не зависят от начальных приближений, что позволяет получить удовлетворительные результаты за разумное время. Стохастические подходы были достаточно хорошо изучены: для решения задачи предложено использовать генетический алгоритм [25], алгоритм имитационного отжига [26], оптимизацию роя частиц [27], алгоритм дифференциальной эволюции [28], алгоритмы рандомизации [29] и др. В ходе разработки стохастических алгоритмов была предложена двухуровневая концепция [30], состоящая из недетерминированных представлений, где один уровень обрабатывает сетевые структуры, определяемые наборами целочисленных переменных, а другой - тепловые нагрузки и коэффициенты деле-

Декомпозиционный метод синтеза оптимальных систем рекуперативного теплообмена

Рассмотрим декомпозиционный метод синтеза, сводящий исходную задачу смешанного программирования к последовательности трех локальных задач: линейного программирования для минимизации суммарных приведенных эксплуатационных затрат, смешанного целочисленного программирования с целью минимизации числа теплообменного оборудования, нелинейного программирования для минимизации приведенных капитальных затрат путем построения гипотетически обобщенной модели системы теплообмена. Опишем эти задачи подробнее. Введем в рассмотрение следующие множества:

$HS_K = \{i | i\text{-ый горячий поток передает тепло на интервале } K\};$

$HS'_K = \{i | i\text{-ый горячий поток присутствует на интервале } K \text{ или следующем интервале}\};$

$CS_K = \{j | j\text{-ый холодный поток требует тепла из интервала } K\};$

$HUS_K = \{nhu | nhu \text{ горячая утилита передает тепло на интервале } K\};$

$HUS'_K = \{nhu | nhu \text{ горячая утилита присутствует на интервале } K \text{ или следующем интервале}\};$

$CUS_K = \{ncu | ncu \text{ холодная утилита извлекает тепло из интервала } K\}.$

Процесс передачи тепла от горячих потоков холодным представим в виде агрегированной транспортной модели с промежуточными пунктами. Для этого разобьем область нагрева холодных и охлаждения горячих потоков на температурные интервалы. Для формализации задачи построим каскадную диаграмму согласно рисунку 2.

Тогда задача линейного программирования минимизации суммарных эксплуатационных затрат примет вид (1)-(7).

ния, представляемые в непрерывном виде [31]. В работе [32] авторы использовали двухуровневый метаэвристический оптимизационный подход, включающий алгоритмы роя частиц и имитации отжига. Применение двухуровневых методов в некоторой степени улучшает результаты синтеза, но также не позволяет определить глобальный оптимум. В работе [33] авторы объединили генетический алгоритм с техникой модифицированного квазилинейного программирования. Однако, стохастические алгоритмы требуют обмена информацией между особями, что может привести к некоторому ослаблению способности к нахождению глобального оптимума на поздних этапах решения задачи. Для преодоления этой проблемы в работе [34] был представлен новый алгоритм случайного перемещения с принудительной эволюцией. Также авторами было разработан упрощенный алгоритм Метрополиса, способствующий организации мутаций структуры, который реализован путем принятия несовершенных решений с определенной вероятностью.

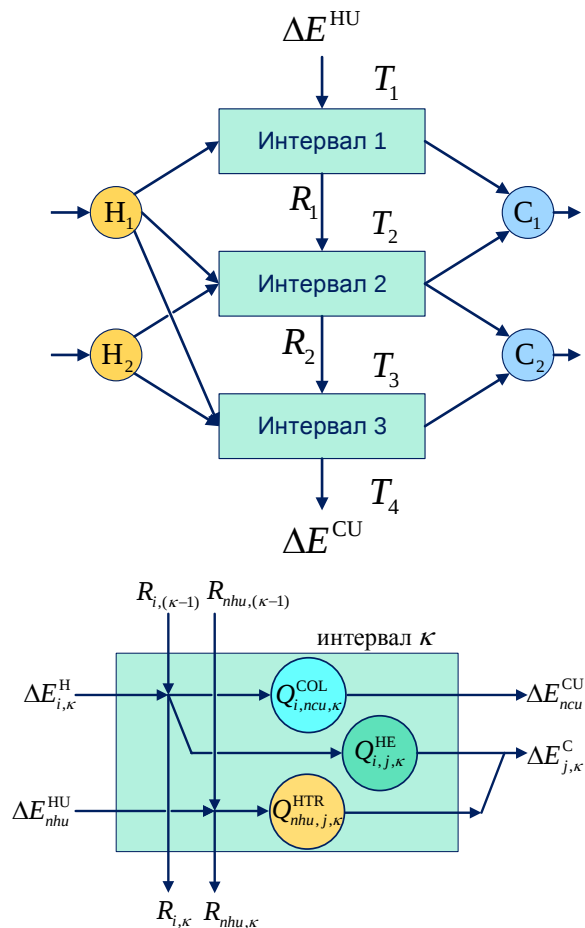


Рис. 2 – Агрегированная транспортная модель с промежуточными пунктами распределения тепловых потоков

Fig. 2 – Aggregated transport model with intermediate points of heat flux distribution

$$\min Z, Z = \sum_{\forall nhu \in HUS} \hat{m}_{nhu} \Delta E_{nhu}^{HU} + \sum_{\forall ncu \in CUS} \hat{m}_{ncu} \Delta E_{ncu}^{CU}, \quad (1)$$

где

$$R_{i,\kappa} - R_{i,(\kappa-1)} + \sum_{\forall j \in CS_\kappa} \Delta Q_{ijk}^{HE} + \sum_{\forall ncu \in CUS_\kappa} \Delta Q_{i,ncu,\kappa}^{COL} = \Delta E_{i,\kappa}^H, \quad (2)$$

$$\forall i \in HS'_\kappa, \forall \kappa \in \mathfrak{R},$$

$$R_{nhu,\kappa} - R_{nhu,(\kappa-1)} + \sum_{\forall j \in CS_\kappa} Q_{nhu,j,\kappa}^{HTR} - \Delta E_{nhu}^{HU} = 0, \quad (3)$$

$$\forall nhu \in HUS'_\kappa, \forall \kappa \in \mathfrak{R},$$

$$\sum_{\forall i \in HS_\kappa} Q_{ijk}^{HE} + \sum_{\forall nhu \in HUS_\kappa} Q_{nhu,j,\kappa}^{HTR} = \Delta E_{jk}^C, \quad (4)$$

$$\forall j \in CS_\kappa, \forall \kappa \in \mathfrak{R},$$

$$\sum_{\forall i \in HS_\kappa} Q_{i,ncu,\kappa}^{COL} - \Delta E_{ncu}^{CU} = 0, \quad (5)$$

$$\forall ncu \in CUS_\kappa, \forall \kappa \in \mathfrak{R},$$

$$R_{i\kappa}, R_{nhu,\kappa}, Q_{ijk}^{HE}, Q_{nhu,j,\kappa}^{HTR}, Q_{i,ncu,\kappa}^{CLR} \geq 0, \quad (6)$$

$$\Delta E_{nhu}^{HU}, \Delta E_{ncu}^{CU} \geq 0, \quad (7)$$

$$R_{i0} = R_{iK} = 0,$$

где $\hat{m}_{nhu}$, $\hat{m}_{ncu}$ – удельные затраты на горячий и холодный теплоносители, соответственно; $\Delta E_{i,\kappa}^H$ и ΔE_{jk}^C – количество теплоты, которое необходимо отобрать от i -го горячего и передать j -му холодному потоку на температурном интервале κ , соответственно; ΔE_{nhu}^{HU} и ΔE_{ncu}^{CU} – количество теплоты, подводимое nhu горячим и отбираемое ncu холодным теплоносителем, соответственно; Q_{ijk}^{HE} , $Q_{nhu,j,\kappa}^{HTR}$, $Q_{i,ncu,\kappa}^{CLR}$ – количество теплоты, передаваемое i -м горячим j -му холодному потоку, nhu горячим теплоносителем j -му холодному потоку, i -м горячим потоком ncu хладагенту на q -ом интервале, соответственно; $R_{i,\kappa}$ и $R_{nhu,\kappa}$ – остаточное количество теплоты i -го горячего потока и nhu горячего теплоносителя на выходе интервала κ . Интервалы температур, на выходе которых остаточное тепло равно нулю, соответствуют пинч-зонам.

Задача смешанного линейного программирования минимизации числа аппаратов теплообмена формализуется в виде (8)-(12).

$$\min \sum_{i \in HS_\theta} \sum_{j \in CS_\theta} y_{ij}^\theta, \quad (8)$$

$$\text{где } R_{i\kappa} - R_{i,(\kappa-1)} + \sum_{\forall j \in CS_\kappa} Q_{ijk}^{HE} = \Delta E_{i\kappa}^H, \quad (9)$$

$$\forall i \in HS'_\kappa, \forall \kappa \in \mathfrak{R}_\theta,$$

$$\sum_{\forall i \in HS_\kappa} Q_{ijk}^{HE} = \Delta E_{jk}^C, \forall j \in CS_\kappa, \forall \kappa \in \mathfrak{R}_\theta, \quad (10)$$

$$\sum_{\forall \kappa \in \mathfrak{R}_\theta} Q_{ijk}^{HE} - Q_{ij}^{U,\theta} y_{ij}^\theta \leq 0, \forall i \in HS_\theta, \forall j \in CS_\theta, \quad (11)$$

$$R_{i\kappa}, Q_{ijk}^{HE} \geq 0, y_{ij}^\theta \in \{0,1\}, \quad (12)$$

где y_{ij}^θ – бинарная переменная, указывающая на наличие/отсутствие рекуперативного теплообмена

между i -м горячим и j -м холодным потоками в подсети θ ; $Q_{ij}^{U,\theta}$ – верхняя граница количества теплоты, отнимаемого от i -го горячего потока и передаваемого j -му холодному потоку в подсети θ и принимает следующее значение:

$$Q_{ij}^{U,\theta} = \min \left\{ \sum_{\kappa \in \mathfrak{R}_\theta} Q_{i\kappa}^H, \sum_{\kappa \in \mathfrak{R}_\theta} Q_{jk}^C \right\}. \quad (13)$$

Задача нелинейного математического программирования минимизации приведенных капитальных затрат решается с использованием суперструктуры. Для этого в полученную структуру для каждого технологического потока встраивается блок теплообмена, приведенный на рисунке 3.

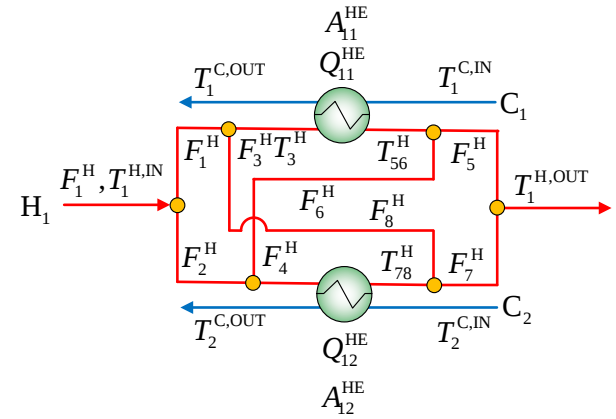


Рис. 3 – Гипотетически обобщенная схема потоков в структуре системы рекуперативного теплообмена

Fig. 3 – Hypothetically generalized scheme of flows in the structure of the regenerative heat exchange system

Формализованная постановка задачи оптимизации принимает вид (14)-(20).

$$\min \Phi$$

$$\Phi = \tilde{m}^{HE} \left[\frac{Q_{11}^{HE}}{U_{11} \left(\frac{\Delta T_1^1 \Delta T_2^1 (\Delta T_1^1 + \Delta T_2^1)}{2} \right)^{\frac{1}{3}}} \right]^{\gamma^{HE}} \quad (14)$$

$$+ \left[\frac{Q_{12}^{HE}}{U_{12} \left(\frac{\Delta T_1^2 \Delta T_2^2 (\Delta T_1^2 + \Delta T_2^2)}{2} \right)^{\frac{1}{3}}} \right]^{\gamma^{HE}}, \quad (15)$$

$$F_1 + F_2 = F, \quad (16)$$

$$F_1 + F_8 - F_3 = 0, F_1 T^{IN} + F_8 T_{78} - F_3 T_3 = 0, \quad (17)$$

$$F_2 + F_6 - F_4 = 0, F_2 T^{IN} + F_6 T_{56} - F_4 T_4 = 0.$$

$$F_3 - F_6 - F_5 = 0, F_4 - F_7 - F_8 = 0, \quad (18)$$

$$Q_{11} - F_3 (T_3 - T_{56}) = 0, Q_{12} - F_4 (T_4 - T_{78}) = 0.$$

$$\Delta T_1^1 = T_3 - T_1^{\text{OUT}}, \Delta T_2^1 = T_{56} - T_1^{\text{IN}}, \quad (19)$$

$$\Delta T_1^2 = T_4 - T_1^{\text{OUT}}, \Delta T_2^2 = T_{78} - T_2^{\text{IN}}.$$

$$\Delta T_1^1 \geq \Delta T_{\text{MIN}}, \Delta T_2^1 \geq \Delta T_{\text{MIN}}, \quad (20)$$

$$\Delta T_1^2 \geq \Delta T_{\text{MIN}}, \Delta T_2^2 \geq \Delta T_{\text{MIN}}.$$

Анализ и синтез системы теплообмена на примере установок гидрокрекинга и гидроочистки

Рассмотренный декомпозиционный метод тепловой интеграции был использован для решения задачи синтеза оптимальных систем теплообмена установок гидрокрекинга и гидроочистки.

В качестве сырья на установку гидрокрекинга поступает смесь прямогонного вакуумного гайзойля и тяжелого газойля коксования. Продуктами являются дизельное топливо, керосин, сжиженный углеводородный газ и нефтя. Установка состоит из следующих основных блоков:

- Блок подготовки сырья (D0101, D0102);
- Блок компримирования подпиточного водорода (D0104, K04101A/B/C, D0402A/B/C);
- Реакторный блок (H0101, R0101, C0202, R0102);
- Блок аминной очистки (D0110, D1021, C0101, D0114);
- Блок фракционирования (C0201, H0201, C0202, C0204);
- Блок производства легких фракций.

Установка гидроочистки предназначена для получения гидроочищенного газойля коксования из тяжелого газойля коксования, очистка которого обусловлена реакциями гидроочистки, гидрообессеривания, гидрирования азотосодержащих соединений, кислородосодержащих соединений, олефинов и ароматических соединений.

Установка гидроочистки включает следующие основные блоки:

- Блок нагрева сырья реактора (E0409, E0416, D0102);
- Реакторный блок (H0101, R0101, A0101, D0107, D0104, D0105, D0106);
- Блок фракционирования (C0302, H0402, C0403, C0404).

Для расчета параметров технологических потоков и существующего теплообменного оборудования в среде пакета Aspen Hysys были разработаны компьютерные модели исследуемых систем. Информационные PFD-схемы представлены на рисунках 4, 5. Расчет констант фазового равновесия и энтальпии производился термодинамическими пакетами Peng-Robinson и UNIQUAC. Погрешность моделирования технологических процессов не превысила 7%. Для расчета рециклов в обоих моделях был выбран метод доминирующего собственного значения (DEM). Анализ установок гидрокрекинга и гидроочистки на компьютерных моделях позволил выделить источники и стоки тепловой энергии. Для оценки потенциала для

энергосбережения нами был проведен пинч-анализ технологических потоков.

В результате проведенного пинч-анализа установки гидрокрекинга был определен энергетический потенциал: предельно возможное количество рекуперированной энергии, составило 236,83 МВт. Исходя из исследованных композитных кривых (рис. 6) можно сделать вывод о наличии существенного потенциала для рекуперации тепловой энергии. Подробные результаты пинч-анализа приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты пинч-анализа установки гидрокрекинга

Table 1 – Results of pinch analysis of hydrocracking unit

Показатель	Принятое значение минимально допустимой разности температур, °C		
	5	7,5	10
1. Суммарное количество отбираемой от горячих потоков энергии, МВт	333,26		
2. Суммарное количество передаваемой холодным потокам энергии, МВт	236,83		
3. Фактическое количество рекуперированной энергии, МВт	158,87		
4. Предельно возможное количество рекуперированной энергии, МВт	236,83		
5. Фактическое количество подводимой энергии потоками утилит, МВт	77,96		
6. Минимальное количество подводимой энергии потоками утилит, МВт	0		
7. Минимальное количество отводимой энергии потоками утилит, МВт	96,43		
8. Температура точки пинча горячего потока, °C	253,21	253,21	253,21
9. Температура точки пинча холодного потока, °C	248,2	245,7	243,2

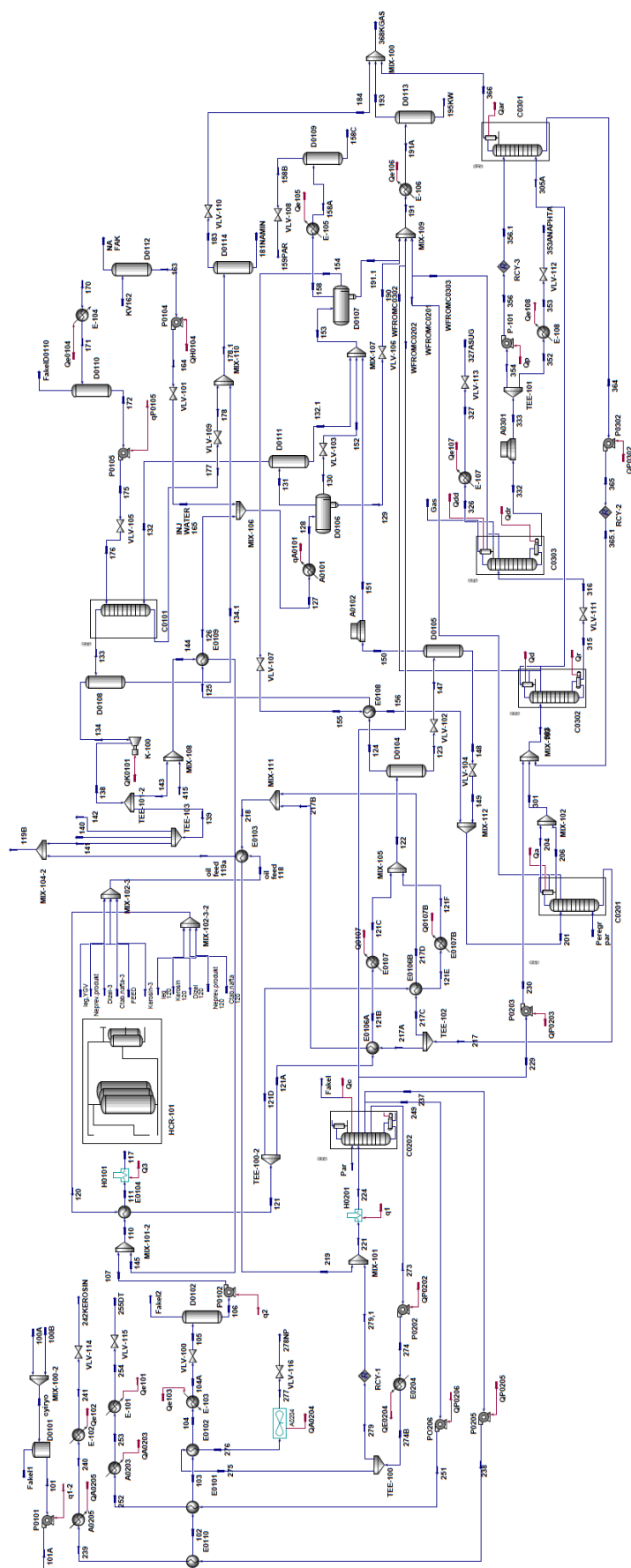


Рис. 4 – PFD-схема установки гидрокрекинга в Aspen HYSYS

Fig. 4 – PFD diagram of the hydrocracking unit at Aspen HYSYS

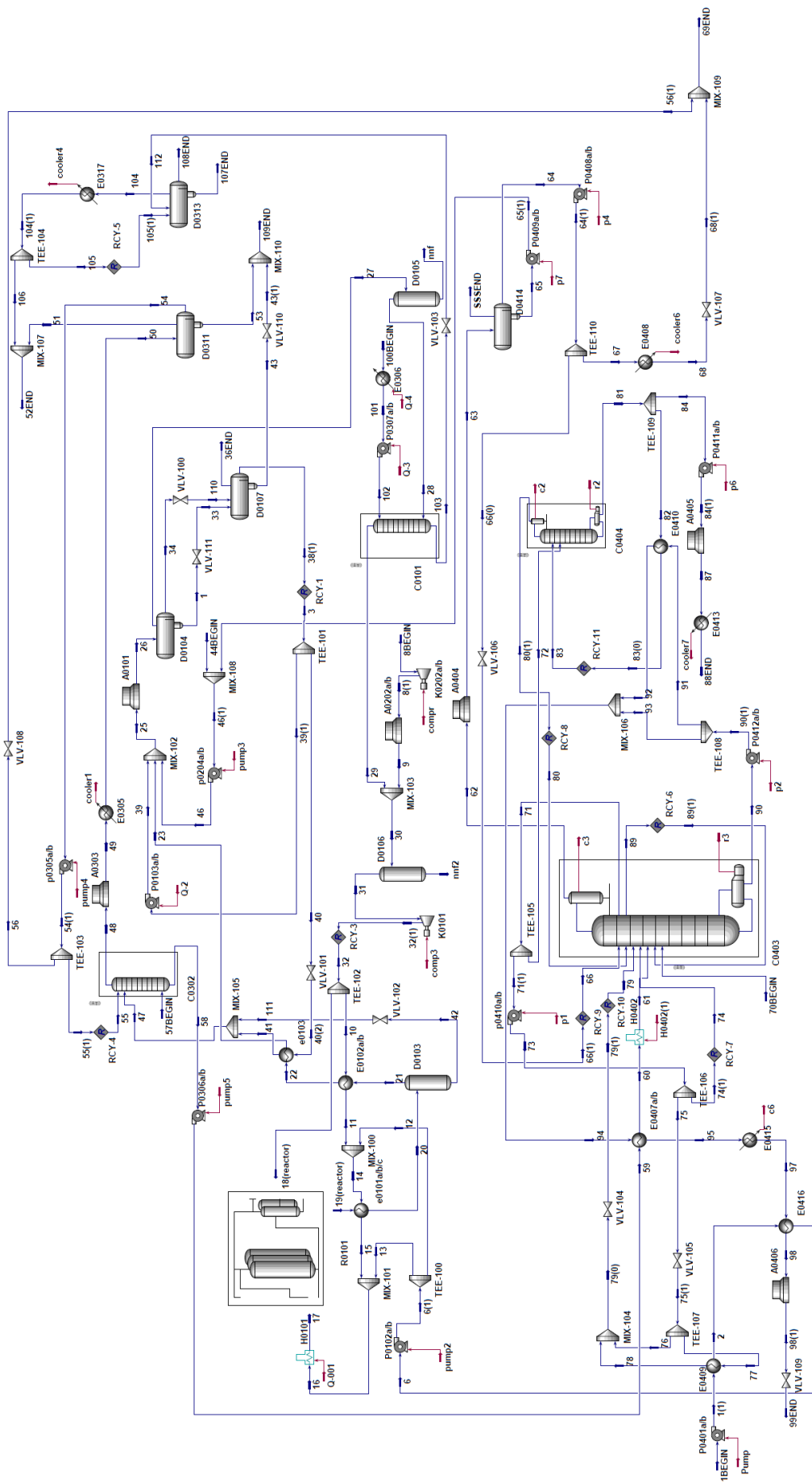


Рис. 5 – PFD-схема установки гидроочистки в Aspen HYSYS
Fig. 5 – PFD diagram of the hydrotreating unit at Aspen HYSYS

Энергетический потенциал предлагаемой схемы организации теплообмена был рассчитан в абсолютном и относительном выражении. Абсолютная погрешность определялась как разность между предельно возможным количеством рекуперлируемой энергии (п. 4 табл. 1) и фактическим количеством рекуперлируемой энергии (п. 3 табл. 1) и составила 77,96 МВт при исследуемых значениях минимально допустимой разности температур в 5, 7,5, 10 °С. Относительная разность составила: 32,92 %.

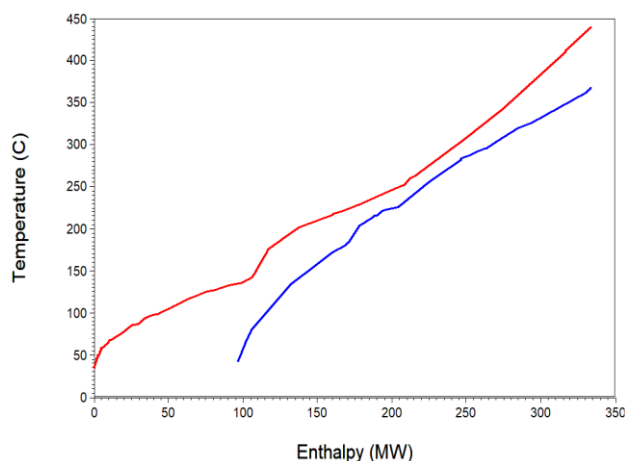


Рис. 6 – Композитные кривые при минимально допустимой разности температур 5, 7,5, 10 °С

Fig. 6 – Composite curves at the minimum allowable temperature difference of 5, 7.5, 10 °С

Результаты анализа установки гидроочистки приведены в таблице 2.

Абсолютная разность составила 11,47 МВт при исследуемых значениях минимально допустимой разности температур в 5, 7,5, 10 °С, что в относительном выражении оценивается на уровне 23,59 %. Композитные кривые (рис. 7) пересекаются по всей области кривой холодных потоков и также не чувствительны к исследуемым значениям минимально допустимой разности температур.

Наличие большого потенциала для энергосбережения является основанием для решения задачи синтеза. В результате решения задачи декомпозиционным методом были определены несколько альтернативных оптимальных структур систем теплообмена и режимов работы аппаратов. Пример такой структуры для установки гидрокрекинга показан на рисунке 8. Значение критерия оптимальности системы оценивается на уровне 2 005 275 у.е./г., что на 26,3% ниже оценки существующей системы.

Значение суммарных приведенных капитальных и операционных затрат системы теплообмена установки гидроочистки составляет 252 232 у.е./г., что на 12,4% ниже рассчитанной стоимости существующей системы теплообмена.

Таблица 2 – Результаты Пинч-анализа установки гидроочистки

Table 2 – Results of Pinch Analysis of Hydrotreating Unit

№ п.п.	Показатель	Принятое значение минимально допустимой разности температур, °С		
		5	7,5	10
1	Суммарное количество отбираемой от горячих потоков энергии, МВт	84,72		
2	Суммарное количество передаваемой холодным потокам энергии, МВт	48,62		
3	Фактическое количество рекуперлируемой энергии, МВт	37,15		
4	Предельно возможное количество рекуперлируемой энергии, МВт	48,62		
5	Фактическое количество подводимой энергии потоками утилит, МВт	11,47		
6	Минимальное количество подводимой энергии потоками утилит, МВт	0		
7	Фактическое количество отводимой энергии потоками утилит, МВт	47,57		
8	Минимальное количество отводимой энергии потоками утилит, МВт	36,10		
9	Температура точки пинча горячего потока, °С	427		
10	Температура точки пинча холодного потока, °С	422	419,5	417

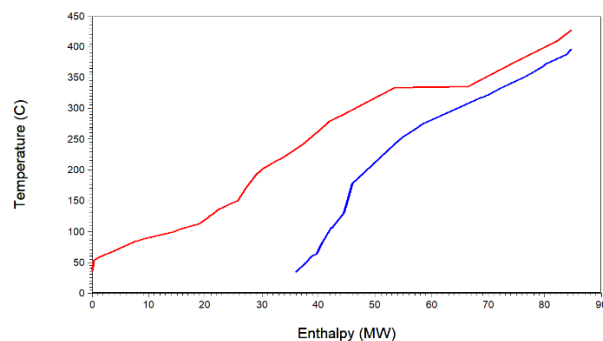


Рис. 7 – Композитные кривые при минимально допустимой разности температур 5, 7,5, 10 °С

Fig. 7 – Composite curves at the minimum allowable temperature difference of 5, 7.5, 10 °С

Заключение

Результаты анализа существующих установок гидрокрекинга и гидроочистки показывают наличие большого потенциала для энергосбережения. Исследованный метод декомпозиционного синтеза в целом дает хорошие результаты как по достигнутому энергетическому потенциалу установок (синтезированные системы позволяют рекуперировать 99,2-99,8% от предельно возможного количества тепловой энергии), так и по критерию суммарных приведенных капитальных и операционных затрат. Стоит отметить, что полученные результаты значительно улучшают качество решения, получаемое с использованием эвристических алгоритмов и классического пинч-метода проектирования. Однако, наличие множества

локальных минимумов требует разработки новых способов декомпозиции задачи и алгоритмов нахождения лучших приближений по поисковым переменным. Рациональным предложением видится организация обратной связи по рассмотренным задачам декомпозиционного алгоритма, а также разработка комбинированных алгоритмов синтеза на основе достоинств термодинамического и алгоритмического подходов. Одним из способов снижения вычислительных затрат и числа экстремумов при поиске решения является внедрение в алгоритм вариантов структурной декомпозиции. Совершенствование методов синтеза оптимальных систем теплообмена позволит решать более сложные задачи крупномасштабной интеграции систем различного термодинамического потенциала.

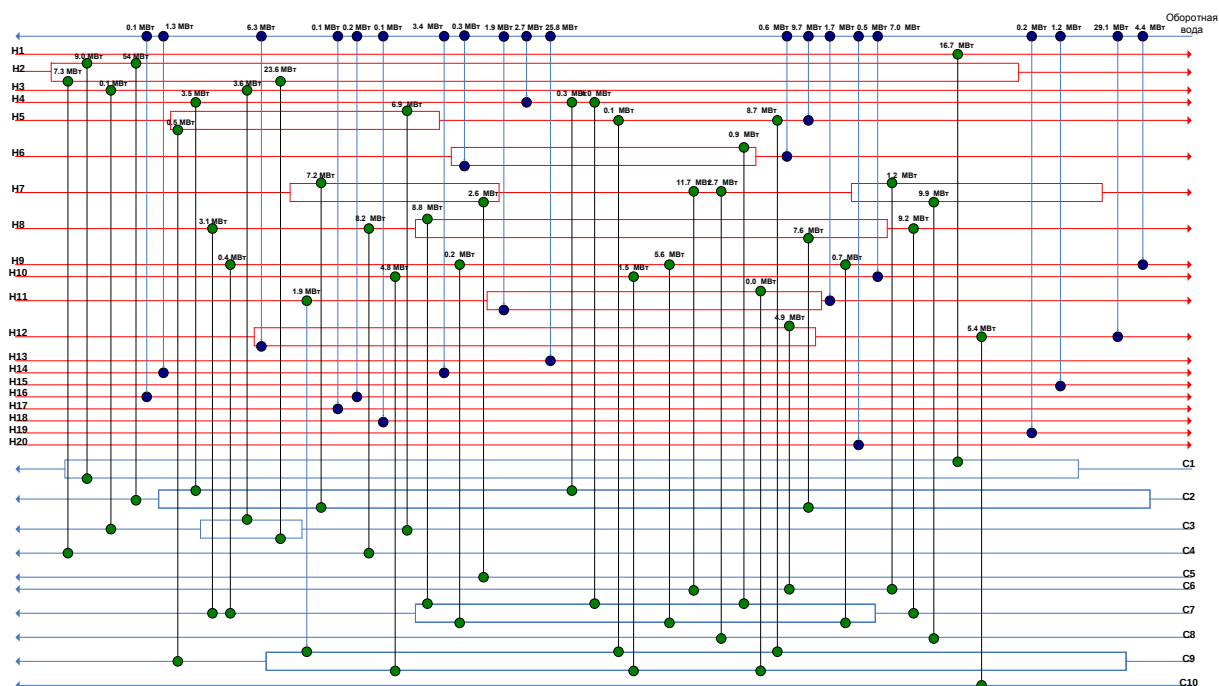


Рис. 8 – Синтезированная оптимальная структура системы теплообмена установки гидрокрекинга
Fig. 8 – Synthesized optimal structure of the heat exchange system of the hydrocracking unit

Литература

- Klemeš J.J., Kravanja Z., *Current Opinion in Chemical Engineering*, V. 2, № 4, P. 461. (2013).
- Morar M., Agachi P.S., *Comput. Chem. Eng.* 2010, V. 34, № 8, P. 1171.
- Цирлин А.М., Ахременков А.А., Григорьевский И.Н., Теорет. основы хим. Технологии, 2008, Т. 42, № 1, С.1.
- Linnhoff, B., Hindmarsh, E. The pinch design method for heat exchanger networks. *Chem. Eng. Sci.* 1983, 38, 745–763.
- Trivedi, K.K., O'Neill, B.K., Roach, J.R., *Comput. Chem. Eng.* 1989, 13, 667–685.
- Wood, R.M., Suaysompol, K., O'Neill, B.K., Roach, J.R., Trivedi, K.K. A New Option for Heat Exchanger Network Design. *Chem. Eng. Prog.* 1991, 87, 38–43.
- H.K. Shethna, J.M. Jezowski, F.J.L. Castillo, *Appl. Therm. Eng.*, 2000., V. 20 (15-16), P. 1577–1587.
- S. Ahmad, B. Linnhoff, R. Smith, *Computers & Chemical Engineering*, Volume 14, Issue 7, 1990, Pages 751–767.
- Chen Y., Grossmann I. E., Miller D.C., *Comput. Chem. Eng.*, 2015, V, 82, P. 68.
- Agarwal A., Gupta S.K., *Ind. Eng. Chem. Res.* 2008, V. 47, P. 3489.
- Емельянов И.И., Зиятдинов Н.Н., Островский Г.М., *Вестник технологического университета*, 2016, т.19, в.17, С.132–137.
- Nemet A., Isafiade A., Jaromir Klemeš J., Kravanja Z., *Chem. Eng. Sci.*, 2018, V, 197, P. 432.
- Yee, T.F., Grossmann, I.E. Simultaneous, *Comput. Chem. Eng.*, 1990, 14, 1165–1184.
- Papoulias, S.A., Grossmann, I.E., *Comput. Chem. Eng.*, 1983, 7, 707–721.
- Cerda J, Westerberg AW, *Chem. Eng. Sci.* 1983, V. 38, № 10, P. 1723.
- Рыжова, А. А., Емельянов, И. И., & Зиятдинов, Н. Н., *Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии*, 2, 41–55.
- Зиятдинов Н.Н., Емельянов И.И., Кубанов Д.В., Баймухаметова Г.З., Ле Куанг Туен, *Вестник технологического университета*. 2018, т.21, в.7, с.91–98
- Зиятдинов Н.Н., Емельянов И.И., Баймухаметова Г.З., Туен Л.К., *Вестник технологического университета*. 2016, т.19, в.15, с.131–136.
- Зиятдинов Н.Н., Островский Г.М., Емельянов И.И., *Теоретические основы химической технологии*, 2016, т.50, в.2, с.184–193.

20. Н.Н. Зиятдинов, И.И. Емельянов, Т.В. Лаптева, А.А. Рыжова, А.Н.Игнатьев, *Теоретические основы химической технологии*, 2020, т.54, в.2, с.144-162.
21. Рыжова А. А., Зиятдинов Н.Н., Емельянов И.И., *Вестник технологического университета*, 2022, т.25, в.3, с.78-82.
22. I. I. Emel'yanov, N.N. Ziyatdinov, T. V. Lapteva, A. A. Ryzhova and R. V. Semin, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2021, т.55, в.6, с.1131-1149.
23. Ryzhova A., Emelyanov I., Ziyatdinov N., Khalirakhmanov Z., *Studies in Systems, Decision and Control*, 2021, в.342, с.335-345.
24. T.V. Lapteva, N.N. Ziyatdinov, I.I. Emel'yanov, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2020, т.54, в.1, с.145-156.
25. Dipama, J., Teyssedou, A., Sorin, M., *Appl. Therm. Eng.*, 2008, 28, 1763–1773.
26. Aguitoni, M.C., Pavão, L.V., Ravagnani, M.A.D.S.S., *Energy* 2019, 181, 654–664.
27. Pavão, L.V., Costa, C.B.B., Ravagnani, M.A.D.S.S., *Comput. Chem. Eng.*, 2016, 94, 370–386.
28. Chen, J., Cui, G., Duan, H., Numer. *Heat Transfer. Part A Appl.*, 2017, 72, 126–140.
29. Pariyani, A., Gupta, A., Ghosh, P., *Comput. Chem. Eng.*, 2006, 30, 1046–1053.
30. Lewin, D.R., *Comput. Chem. Eng.*, 1998, 22, 1387–1405.
31. Huo, Z., Zhao, L., Yin, H., Ye, J., *Korean J. Chem. Eng.*, 2012, 29, 1298–1309.
32. Santos, L.F., Costa, C.B.B., Caballero, J.A., Ravagnani, M.A.S.S., *Appl. Energy*, 2020, 262, 114441.
33. Feyli, B., Soltani, H., Hajimohammadi, R., Fallahi-Samberana, M., Eyvazzadeha, A., *Chem. Eng. Sci.*, 2022, 248, 117140.
34. Xiao, Y., Cui, G., *Appl. Therm. Eng.*, 2017, 115, 1118–1127.
10. Agarwal A., Gupta S.K., *Ind. Eng. Chem. Res.* 2008, V. 47, P. 3489.
11. Emelyanov I.I., Ziyatdinov N.N., Ostrovsky G.M., *Herald of Technological University*, 2016, Vol.19, V.17, pp.132-137.
12. Nemet A., Isafiade A., Jaromír Klemeš J., Kravanja Z., *Chem. Eng. Sci.*, 2018, V, 197, P. 432.
13. Yee, T.F., Grossmann, I.E., Simultaneous, *Comput. Chem. Eng.*, 1990, 14, 1165-1184.
14. Papoulias, S.A., Grossmann, I.E., *Comput. Chem. Eng.*, 1983, 7, 707-721.
15. Cerda J, Westerberg AW, *Chem. Eng. Sci.* 1983, V. 38, № 10, P. 1723.
16. Ryzhova, A. A., Emelyanov, I. I., & Ziyatdinov, N. N., *Vestnik VSU. Series: System Analysis and Information Technologies*, 2, 41-55.
17. Ziyatdinov, N.N., Emelyanov, I.I., Kubanov, D.V., Baimukhametova, G.Z., Le Quang Tuyen, *Vestnik of Technological University*. 2018, vol.21, v.7, p.91-98
18. Ziyatdinov N.N., Emelyanov I.I., Baimukhametova G.Z., Le Quang Tuyen L.K., *Herald of Technological University*. 2016, vol.19, v.15, p.131-136
19. Ziyatdinov N.N., Ostrovskiy G.M., Emelyanov I.I., *Theoretical bases of chemical technology*, 2016, vol.50, v.2, pp.184-193.
20. N.N. Ziyatdinov, I.I. Emelyanov, T.V. Lapteva, A.A. Ryzhova, A.N. Ignatyev, *Theoretical bases of chemical technology*, 2020, vol.54, v.2, pp.144-162.
21. A.A. Ryzhova, N.N. Ziyatdinov, I.I. Emelyanov, *Vestnik of Technological University*, 2022, vol.25, v.3, pp.78-82.
22. I. I. Emel'yanov, N.N. Ziyatdinov, T. V. Lapteva, A. A. Ryzhova and R. V. Semin, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2021, vol.55, v.6, pp.1131-1149.
23. Ryzhova A., Emelyanov I., Ziyatdinov N., Khalirakhmanov Z., *Studies in Systems, Decision and Control*, 2021, v.342, p.335-345.
24. T.V. Lapteva, N.N. Ziyatdinov, I.I. Emel'yanov, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2020, vol.54, v.1, pp.145-156.
25. Dipama, J., Teyssedou, A., Sorin, M., *Appl. Therm. Eng.*, 2008, 28, 1763-1773.
26. Aguitoni, M.C., Pavão, L.V., Ravagnani, M.A.D.S.S., *Energy* 2019, 181, 654-664.
27. Pavão, L.V., Costa, C.B.B., Ravagnani, M.A.D.S.S., *Comput. Chem. Eng.*, 2016, 94, 370-386.
28. Chen, J., Cui, G., Duan, H., Numer. *Heat Transfer. Part A Appl.*, 2017, 72, 126-140.
29. Pariyani, A., Gupta, A., Ghosh, P., *Comput. Chem. Eng.*, 2006, 30, 1046-1053.
30. Lewin, D. R., *Comput. Chem. Eng.*, 1998, 22, 1387-1405.
31. Huo, Z., Zhao, L., Yin, H., Ye, J., *Korean J. Chem. Eng.*, 2012, 29, 1298-1309.
32. Santos, L.F., Costa, C.B.B., Caballero, J.A., Ravagnani, M.A.S.S., *Appl. Energy*, 2020, 262, 114441.
33. Feyli, B., Soltani, H., Hajimohammadi, R., Fallahi-Samberana, M., Eyvazzadeha, A., *Chem. Eng. Sci.*, 2022, 248, 117140.
34. Xiao, Y., Cui, G., *Appl. Therm. Eng.*, 2017, 115, 1118-1127.

References

1. Klemeš J.J., Kravanja Z., *Current Opinion in Chemical Engineering*, V. 2. No. 4. P. 461. (2013).
2. Morar M., Agachi P.S., *Comput. Chem. Eng.* 2010, V. 34, № 8, P. 1171.
3. Tsilin, A.M., A.A. Akhremenkov, I.N. Grigorevskiy, *Theoret. bases of chemical engineering*, 2008, V. 42, No. 1, p.1.
4. Linnhoff, B., Hindmarsh, E. The pinch design method for heat exchanger networks. *Chem. Eng. Sci.*, 1983, 38, 745-763.
5. Trivedi, K.K., O'Neill, B.K., Roach, J.R., *Comput. Chem. Eng.* 1989, 13, 667-685.
6. Wood, R.M., Suaysompol, K., O'Neill, B.K., Roach, J.R., Trivedi, K.K., A New Option for Heat Exchanger Network Design. *Chem. Eng. Prog.* 1991, 87, 38-43.
7. H.K. Shethna, J.M. Jezowski, F.J.L. Castillo, *Appl. Therm. Eng.*, 2000., V. 20 (15-16), P. 1577-1587.
8. S. Ahmad, B. Linnhoff, R. Smith, *Computers & Chemical Engineering*, Volume 14, Issue 7, 1990, Pages 751-767.
9. Chen Y., Grossmann I. E., Miller D. C., *Comput. Chem. Eng.*, 2015, V, 82, P. 68.

© Э. А. Исхаков – магистрант кафедры «Системотехника», Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, emilfrank21@gmail.com; Р. Ф. Калимуллин – магистрант кафедры «Системотехника», КНИТУ, ruslan2609-kalimullin@mail.ru. И. И. Емельянов – к.т.н., доцент кафедры «Системотехника» КНИТУ, ilyaemelyan@gmail.com, А. С. Сильвестрова – старший преподаватель кафедры «Системотехника» КНИТУ, sensoriums@mail.ru, Н. Н. Зиятдинов – д.т.н., профессор кафедры «Системотехника» КНИТУ, nnziat@yandex.ru.

© E. A. Iskhakov – Master-student of the Department of System Engineering (SE), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, emilfrank21@gmail.com; R. F. Kalimullin – Master-student of the SE Department, KNRTU, ruslan2609-kalimullin@mail.ru; I. I. Emelyanov – PhD (Technical sci.), Associate Professor of the SE department, KNRTU, ilyaemelyan@gmail.com; A. S. Silvestrova – Senior Lecturer of the SE department, KNRTU, sensoriums@mail.ru; N. N. Ziyatdinov – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the SE department, KNRTU, nnziat@yandex.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 01.04.25.

Дата принятия рукописи в печать – 10.04.25.