

Научное сообщение  
УДК 665.6/.7:004.9  
ББК 35.514-1<sub>С</sub>51+35.112<sub>С</sub>51  
В 19  
DOI: 10.53598/2410-3225-2024-1-336-80-91

**Развитие методов тепловой интеграции и их апробация  
на установках первичной и вторичной переработки нефти\***  
(Рецензирована)

**Михаил Анатольевич Васильев<sup>1</sup>, Максим Викторович Канищев<sup>2</sup>,  
Роман Евгеньевич Чибисов<sup>3</sup>**

<sup>1-3</sup> ООО «РусЭнергоПроект», Москва, Россия, [mavasiliev@rusenergoproekt.com](mailto:mavasiliev@rusenergoproekt.com)

**Аннотация.** В нефтеперерабатывающей, химической и нефтехимической промышленности основные операционные затраты приходятся на топливно-энергетические ресурсы, необходимые для нагрева и охлаждения сырья и произведенных продуктов. В работе рассматриваются подходы для оптимизации действующих регенеративных теплообменных систем (РТС) с учетом имеющихся технологических ограничений. Разработанный авторами алгоритм основан на методах пинч-анализа, при этом существенно дополняет алгоритмы поиска оптимального размещения РТС. Реализация алгоритма в виде программного обеспечения позволит осуществлять поиск оптимальной конфигурации РТС в зависимости от различных критериев оптимума с учетом технических и экономических ограничений, уменьшив влияние человеческого фактора, а также позволит сократить время от начала разработки решения до окончания реализации проекта по внедрению оптимальной РТС.

**Ключевые слова:** пинч-анализ, теплообменные сети, тепловые насосы, нефтепереработка, нефтехимия, компьютерное моделирование

**Для цитирования:** Васильев М. А., Канищев М. В., Чибисов Р. Е. Развитие методов тепловой интеграции и их апробация на установках первичной и вторичной переработки нефти // Вестник Адыгейского государственного университета. Сер. : Естественно-математические и технические науки. 2024. Вып. 1 (336). С. 80–91. DOI: 10.53598/2410-3225-2024-1-336-80-91

Scientific Message

**Development of heat integration methods and their testing  
at prime and secondary oil refining plants\*\***

**Mikhail A. Vasilyev<sup>1</sup>, Maksim V. Kanishchev<sup>2</sup>, Roman E. Chibisov<sup>3</sup>**

<sup>1-3</sup> RusEnergoproekt LLC, Moscow, Russia, [mavasiliev@rusenergoproekt.com](mailto:mavasiliev@rusenergoproekt.com)

**Abstract.** In the oil refining, chemical and petrochemical industries, the main operating costs fall on fuel and energy resources necessary for heating and raw materials cooling and manufactured products. This paper discusses approaches for optimizing operating regenerative heat exchange systems (RHES), taking account of the available technological constraints. The algorithm developed by the authors is based on pinch analysis methods, while significantly complementing the algorithms for finding optimal RHES placement. Realization of the algorithm in the form of software will make it possible to search for the optimal RHES configuration depending on various optimum criteria taking into account technical and economic constraints, reducing the influence of the human factor, as well as reduce the time from the beginning of solution development to the end of the project to implement the optimal RHES.

**Keywords:** Pinch Analysis, heat exchange networks, heat pumps, oil refining, petrochemistry, computer modeling

---

\* Авторы публикации являются сотрудниками ООО «РусЭнергоПроект». Исходные данные, используемые в публикации, были предоставлены ООО «РусЭнергоПроект».

\*\* The authors of the publication are employees of LLC RusEnergoproekt. The source data used in the publication were provided by LLC RusEnergoproekt.

**For citation:** Vasilyev M. A., Kanishchev M. V., Chibisov R. E. Development of heat integration methods and their testing at prime and secondary oil refining plants // The Bulletin of the Adyghe State University. Ser. : Natural-Mathematical and Technical Sciences. 2024. Iss. 1 (336). P. 80–91. DOI: 10.53598/2410-3225-2024-1-336-80-91

## Введение

Нефтепереработка и нефтехимия являются энергоемкими отраслями промышленности, где потребление энергии существенно влияет на себестоимость готовой продукции. Повышение энергоэффективности процессов на существующих нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводах является важным элементом устойчивого развития Российской Федерации, как и многих нефтедобывающих стран.

В данной работе рассмотрены процессы атмосферной и вакуумной дистилляции, процессы гидроочистки дизельного топлива и процесс получения этилбензола. С помощью стационарных и переносных приборов проводились измерения параметров технологических потоков. Измерялись температуры потоков, скорости потоков и составы отходящих газов печи. Измерялись расход и температура охлаждающей воды, а также расход топлива в печах.

При анализе статистических данных работы технологических установок за три года определено, что технологические процессы потребляют в основном тепловую энергию [1]. Следовательно, именно в области рекуперации потребляемой производством тепловой энергии лежит основной потенциал сокращения энергопотребления и, как следствие, сокращения выбросов парниковых газов от сжигания топлива в печах.

Существует несколько подходов к проектированию рекуперативных теплообменных сетей (РТС) химических процессов, позволяющих снизить энергозатраты. Интеграция процессов – наиболее распространенный метод снижения энергопотребления в перерабатывающей промышленности [2]. Основными направлениями являются методы математического программирования и пинч-анализ.

Методы математического программирования позволяют решить практически любую задачу оптимизации энергопотребления в промышленности. Авторы в своей статье представили подход к многоуровневому программированию для решения проблемы круглосуточного принятия решений, с которой сталкивается сеть на основе комбинированного производства тепла и электроэнергии (ТЭЦ) [3]. Методология, основанная на тепловой интеграции и смешанном целочисленном линейном программировании для представления энергетических потребностей процесса с различными интерфейсами теплообмена, была предложена Бютюном и др. [4]. Несмотря на свою эффективность, математические методы имеют свои недостатки, главным из которых является сложность проверки полученных результатов и то, что под каждый новый процесс приходится практически с нуля разрабатывать свою математическую модель. Это существенно усложняет использование математического программирования при оптимизации реального производства.

Вторым направлением тепловой интеграции является пинч-анализ. Одной из первых работ в области интеграции процессов была диссертационная работа Е. С. Хохманна из Университета Южной Каролины США [5], в которой дано термодинамическое определение минимальной величины энергопотребления в теплообменной системе. Дальнейшее развитие тепловая интеграция получила в работах Линнхоффа и Фловера [6], Фловера и Линнхоффа [7], магистерской диссертации Бодо Линнхоффа в Университете Цюриха [8], а также в работах японских исследователей: Умеда и др. [9], Такама и др. [10], Ито и др. [11]. Они сделали значительный вклад в развитие методов синтеза теплообменных систем. Метод пинч проектирования интегрированных теплообменных сетей предложен в работе Линнхоффа и Хайдмарша [12]. Классическая формулировка тепловой интеграции была сделана в книге Б. Линнхоффа и др. [13]. К пуб-

фикации работы [13] были созданы методы пинч проектирования для синтеза энергоэффективных систем оптимизированных процессов. Одновременно развивались методы линейного и нелинейного программирования синтеза оптимальных энергоэффективных систем теплообменников [14, 15]. Большинство опубликованных работ было посвящено так называемым корневым проектам, т. е. синтезу новых энергоэффективных систем теплообмена для оптимизированных процессов. В последнее время больше внимания уделяется тепловой интеграции в системах теплообмена работающих предприятий. Методы линейного и нелинейного программирования для синтеза энергоэффективных систем теплообмена рассматривались в работах [16–19].

За время существования методы интеграции процессов и, в частности, методы пинч-анализа получили широкое распространение и в настоящее время являются одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений в технических науках и их приложениях. По данным авторов работы [20], за последние 15 лет только в одной наукометрической базе Web of Science (WoS) зафиксировано около 1500 статей, направленных на создание интегрированных процессов и технологических схем, из них 40 % связано с созданием оптимальных систем теплообмена, 30 % – с созданием систем разделения, включая ректификацию. В целом в мире количество работ в этих направлениях превышает число работ, фиксируемых в WoS.

Среди всех работ можно выделить два больших направления: работы, связанные с созданием новых интегрированных (корневых) проектов, и работы, связанные с созданием методов реконструкции действующих производств. В работе [21] рассматривается реконструкция системы теплообмена только за счет переобвязки существующих теплообменных аппаратов с помощью методов пинч проектирования.

Современные исследования сфокусированы в основном на развитии инструментов и методов для синтеза интегрированных теплообменных систем (ТС) с большим числом технологических потоков, развитии методов глобальной оптимизации ТС и методов синтеза гибких ТС, т. е. оптимизации процессов теплообмена в ТС, близких к реально существующим на работающих заводах.

Российские ученые наряду с зарубежными внесли значительный вклад в развитие и применение методов интеграции процессов. Методы интеграции процессов в компании «РусЭнергоПроект» развиваются с 2009 года, а первые результаты по оптимизации отделения дистилляции каменноугольной смолы были представлены на конференции в Праге в 2010 году [22]. Продолжение исследования оптимизации процессов дистилляции каменноугольной смолы было опубликовано в 2013 году [23], а в 2015 авторы представили работу по совместной интеграции двух соседних цехов дистилляции каменноугольной смолы [24]. Апробация методов пинч-анализа при оптимизации процесса разделения углеводов представлена авторами в 2016 году [25]. С 2016 года авторами исследовались технические и экономические ограничения при реализации проектов реконструкции с помощью методов пинч-анализа, результаты были представлены на международной конференции в городе Дубровник SDEWES 2017 [26]. Применение методов интеграции процессов для сравнительного анализа энергоэффективности различных технологических процессов было опубликовано авторами в 2018 году [27]. Межцеховая интеграция на газоперерабатывающих предприятиях и интеграция теплового насоса в процесс производства этилбензола были исследованы в 2019 [28] и 2021 году [29]. Результаты применения пинч-анализа для оптимизации установок гидроочистки дизельного топлива представлены авторами в 2019 [30–32] и 2020 году [33].

В процессе поиска решений по оптимизации существующих рекуперативных теплообменных систем и проектировании новых оптимальных РТС исследованы структуры систем теплообмена и режимы функционирования систем теплообмена на 17 отечественных крупнейших нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях.

Для 150 технологических процессов выполнено имитационное моделирование системы теплообмена и системы разделения в среде Aspen Hysys. Изучены существующие методики, алгоритмы и процедуры принятия решений по анализу и оптимизации энергоэффективности рекуперативных теплообменных систем.

Проведенный анализ научных работ в направлении энергоэффективной модернизации РТС промышленных предприятий показал, что снижение потребления внешних горячих и холодных энергоносителей осуществляется за счет увеличения мощности рекуперации тепловой энергии в системах теплообмена технологических установок. Особенно ярко это выражено в технологиях нефтепереработки и нефтехимии.

Также стоит заметить, что большинство проектов пинч интеграции выполнено для базовых проектов технологических установок. Пинч-анализ позволил формализовать такое проектирование, т. е. превратил проектирование энергоэффективных РТС из эвристики в науку. В то же время практически отсутствуют простые методы проектирования РТС действующих предприятий, которые максимально сохраняют существующую топологию РТС и учитывают экономические, технические, технологические и экологические ограничения.

На основании анализа существующих РТС и научной литературы сделан вывод, что использование классических методов интеграции процессов сталкивается с ограничениями при модернизации реальных производств и в настоящий момент отсутствует системный подход по проектированию энергоэффективных РТС с учетом технологических и экономических ограничений.

Авторами разработан алгоритм принятия решений по поиску пути оптимизации и проектирования энергоэффективных РТС, основанный на методах пинч-анализа, при этом существенно дополненный алгоритмами поиска оптимального размещения РТС, включая технические и экономические ограничения как для вновь проектируемых РТС, так и при реконструкции существующих РТС. В том числе реализован поиск оптимального температурного напора и оптимальной конфигурации РТС в зависимости от различных критериев оптимума, таких как: максимальный дисконтированный доход, минимальный срок окупаемости, максимальное увеличение рекуперации и сокращение выбросов CO<sub>2</sub>.

### **Материалы и методы**

В рамках решения актуальной научно-практической задачи повышения энергоэффективности и сокращения выбросов парниковых газов на отечественных перерабатывающих предприятиях, разработан алгоритм поиска пути оптимального повышения рекуперации тепловой энергии. На основании значительного эмпирического опыта, авторами создано методическое и программно-информационное обеспечение принятия решений по анализу и оптимизации энергоэффективности РТС с учетом технологических ограничений действующего производства, позволяющее учитывать эффективность существующих теплообменников, влияние графика капитального ремонта на срок реализации проекта, ограничения свободного места для установки новых теплообменников (при определении габаритов учитывается тип теплообменного аппарата) как для всего проекта, так и для отдельных технологических потоков (имеется возможность выделения из общего массива данных отдельных потоков и рассмотрение возможности увеличения рекуперации между ними).

Осуществлена возможность выбора цели для сокращения энергопотребления: общее энергопотребление, конкретная печь или утилитный теплообменник. Реализована возможность задания диапазона работы существующих печей и влияние сокращения сжигания топлива в печах на их КПД или выработку пара в котлах утилизаторах, если такая имеется.

Фрагмент алгоритма поиска оптимального пути реконструкции РТС представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Блок-схема алгоритма синтеза оптимальной рекуперативной теплообменной системы  
Fig. 1. Block diagram of the algorithm for synthesizing an optimal recuperative heat exchange system

### Результаты исследований

Разработанный алгоритм оптимального автоматического поиска пути оптимизации систем теплообмена реализован в виде программного обеспечения “Pinch-SELOOP”, позволяет проводить поиск оптимальной конфигурации РТС в зависимости от различных критериев оптимума с учетом технических и экономических ограничений, уменьшив влияние человеческого фактора, а также позволяет сократить время от начала разработки решения до окончания реализации проекта по внедрению оптимальной РТС. Внедрение “Pinch-SELOOP” дает возможность разрабатывать в автоматическом режиме проекты по сокращению удельного энергопотребления процесса при неизменном качестве выпускаемой продукции.

Разработанное программное обеспечение “Pinch-SELOOP” внедрено в производственный процесс ООО «РусЭнергоПроект» и используется при разработке решений при проектировании новых систем теплообмена, а также при модернизации существующих РТС. Программа “Pinch-SELOOP” использовалась ООО «РусЭнергоПроект» в рамках выполнения работ при подготовке вариантов интеграции тепловых потоков установки производства этилбензола в целях снижения энергозатрат, а также на ЭЛОУ-АВТ-6 и на установке гидроочистки Л-24/8с.

Для установки производства этилбензола применение программного обеспечения (ПО) “Pinch-SELOOP” позволило разработать в автоматическом режиме на основании полученных исходных данных схему повышения рекуперации тепловой энергии путем установки тепловых насосов.

Эффект мероприятия заключается в повышении температуры паров этилбензола из К-62 за счет сжатия в компрессоре и дальнейшего использования теплового потенциала паров К-62 для нагрева куба колонны К-52 в новом теплообменнике N-1.

Для реализации мероприятия необходимо установить компрессор и один новый теплообменник. Принципиальная схема участка реконструкции представлена на рисунке 2.

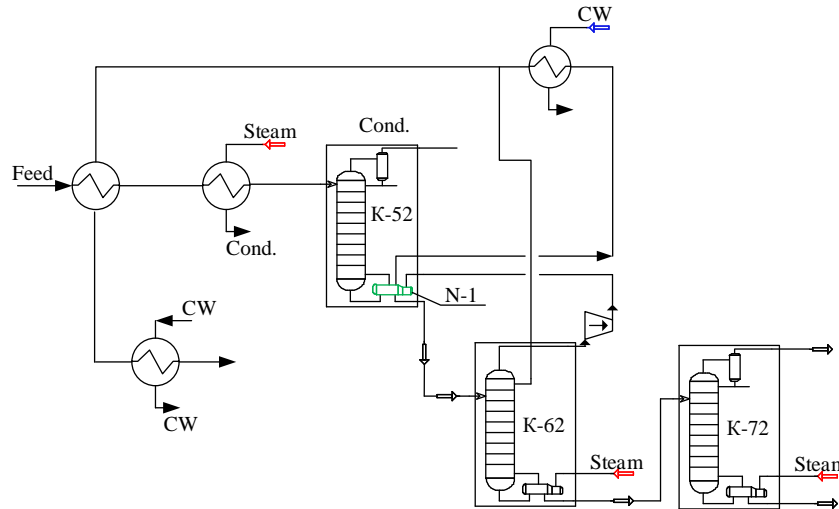


Рис. 2. Принципиальная схема участка реконструкции завода по производству этилбензола

Fig. 2. Schematic diagram of the reconstruction area of ethylbenzene production plan

Компактное расположение оборудования на установке производства этилбензола позволяет объединить тепловой насос между двумя колоннами, что дает возможность получить более высокий коэффициент преобразования теплового насоса и дает возможность существенно повысить экономическую эффективность интеграции теплового насоса.

Эффективность предложенного решения проверена с помощью компьютерного моделирования. Модель проекта реконструкции с использованием схемы теплового насоса представлена на рисунке 3, где N-1 – новый пластинчатый теплообменник. Коэффициент теплопередачи (чистый) составляет 1060 Вт/(м<sup>2</sup>×К). Площадь поверхности теплообмена 132,5 м<sup>2</sup>.

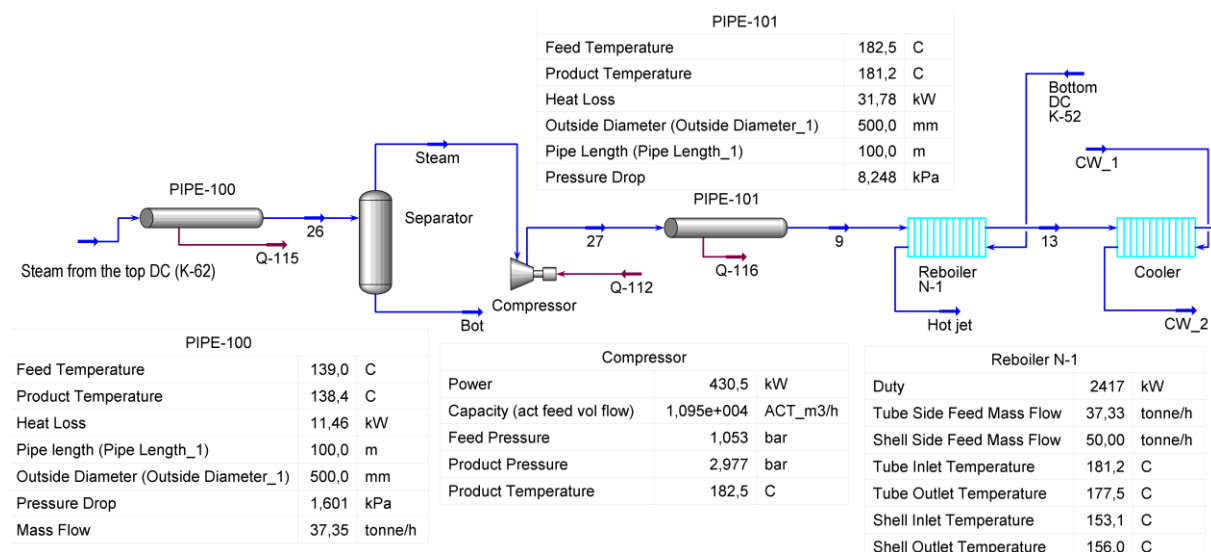


Рис. 3. Модель участка реконструкции системы теплообмена установки производства этилбензола

Fig. 3. Model of the reconstruction section of the heat exchange system of the unit ethylbenzene production

Основные экономические показатели проекта установки теплового насоса представлены в таблице 1.

Таблица 1

Технико-экономические показатели проекта модернизации  
Table 1. Technical and economic indicators of the modernization project

Параметр	Значение
Сокращение потребления тепловой энергии, Гкал/ч	3,8
Сокращение выбросов парниковых газов, тонн CO <sub>2</sub> экв/ч	1,0
Капитальные затраты, включая СМР и ПНР, млн. руб.	271,701
NPV, млн. руб.	501,431
IRR, %	47,2
DPP, лет	4,1
PI	2,9

Условные обозначения: NPV – чистый дисконтированный доход; IRR – внутренняя норма доходности; DPP – дисконтированный срок окупаемости; PI – индекс прибыльность инвестиций.

Доклад по данному решению был представлен на международной конференции PRES 2020, в городе Сиань КНР, выиграл номинацию “The best poster competition Zdenek Burianec memorial awards”.

Применение “Pinch-SELOOP” для создания энергоэффективной РТС на установке ЭЛОУ-АВТ-6 позволило синтезировать оптимальную с точки зрения достигнутого NPV схему реконструкции.

Исследуемый технологический процесс имеет 19 рекуперативных теплообменников с площадью поверхности теплообмена 1000 м<sup>2</sup> каждый, что является существенным экономическим ограничением при разработке проекта реконструкции, т. к. делает процесс замены теплообменника по позиции нерентабельным, следовательно, одной из ключевых задач при разработке данного проекта было максимально сохранить в схеме существующие теплообменные аппараты.

Разработанная авторами методология использует утилитные пути в сочетании с анализом эффективности существующих теплообменников. Также приоритет отдается технологическим потокам с наибольшей теплоемкостью потока (рис. 4).

С помощью “Pinch-SELOOP” была синтезирована новая РТС, в которой используются 18 существующих теплообменников, что существенно снизило затраты при реконструкции установки (рис. 5).

На примере ЭЛОУ-АВТ показан путь реконструкции для непрерывного производства, при котором исходная теплообменная сеть имеет значительную поверхность. Проектирование совершенно новой (оптимальной) схемы теплообмена для непрерывного производства приводит к значительным затратам в связи с увеличением сроков планового ремонта, что существенно влияет на экономическую эффективность проектов реконструкции. Предложенное решение позволяет провести реконструкцию производства в условиях планового ремонта (30–45 дней) или в процессе работы установки. Фактически предложенный путь – единственный способ приблизить эффективность существующих технологических процессов, многие из которых были спроектированы в 60–80-е годы прошлого века, к современным значениям новых установок.

Для установок ЭЛОУ-АВТ на основании предложенного решения был зарегистрирован патент № 2767243 «Энергоэффективная линия нагрева сырья на технологической установке ЭЛОУ-АВТ».

На установке гидроочистки Л-24/8с с помощью “Pinch-SELOOP” был разработан проект по увеличению рекуперации между потоками газо-сырьевой и газо-продуктовой смеси. Алгоритмы ПО позволили эффективно оценить требуемую поверхность для достижения максимального значения NPV.

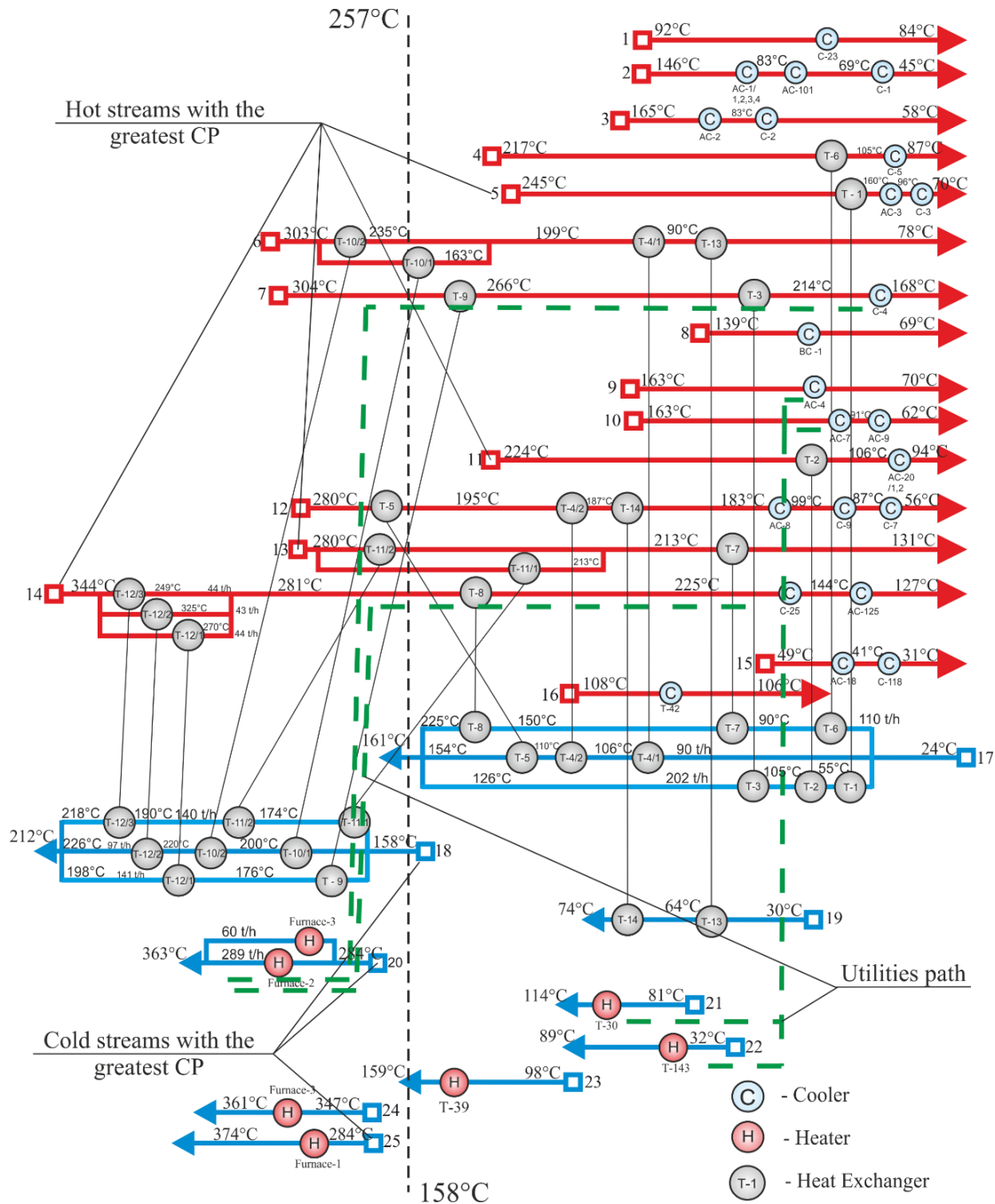


Рис. 4. Схема с обозначением приоритетов модернизации РТС  
 Fig. 4. Schematic outlining priorities for RHES modernization

## Выводы

Разработка и реализация алгоритмов оптимального поиска пути размещения РТС в виде программного обеспечения “Pinch-SELOOP” позволили осуществить ряд проектов повышения энергоэффективности на отечественных предприятиях. ПО “Pinch-SELOOP” было внедрено в производственный процесс ООО «РусЭнергоПроект» при работе над созданием проектов реконструкции систем теплообмена на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях, что позволило апробировать ПО как на первичных, так и на вторичных процессах переработки нефти, а также на процессах нефтехимии при реконструкции установки производства этилбензола.



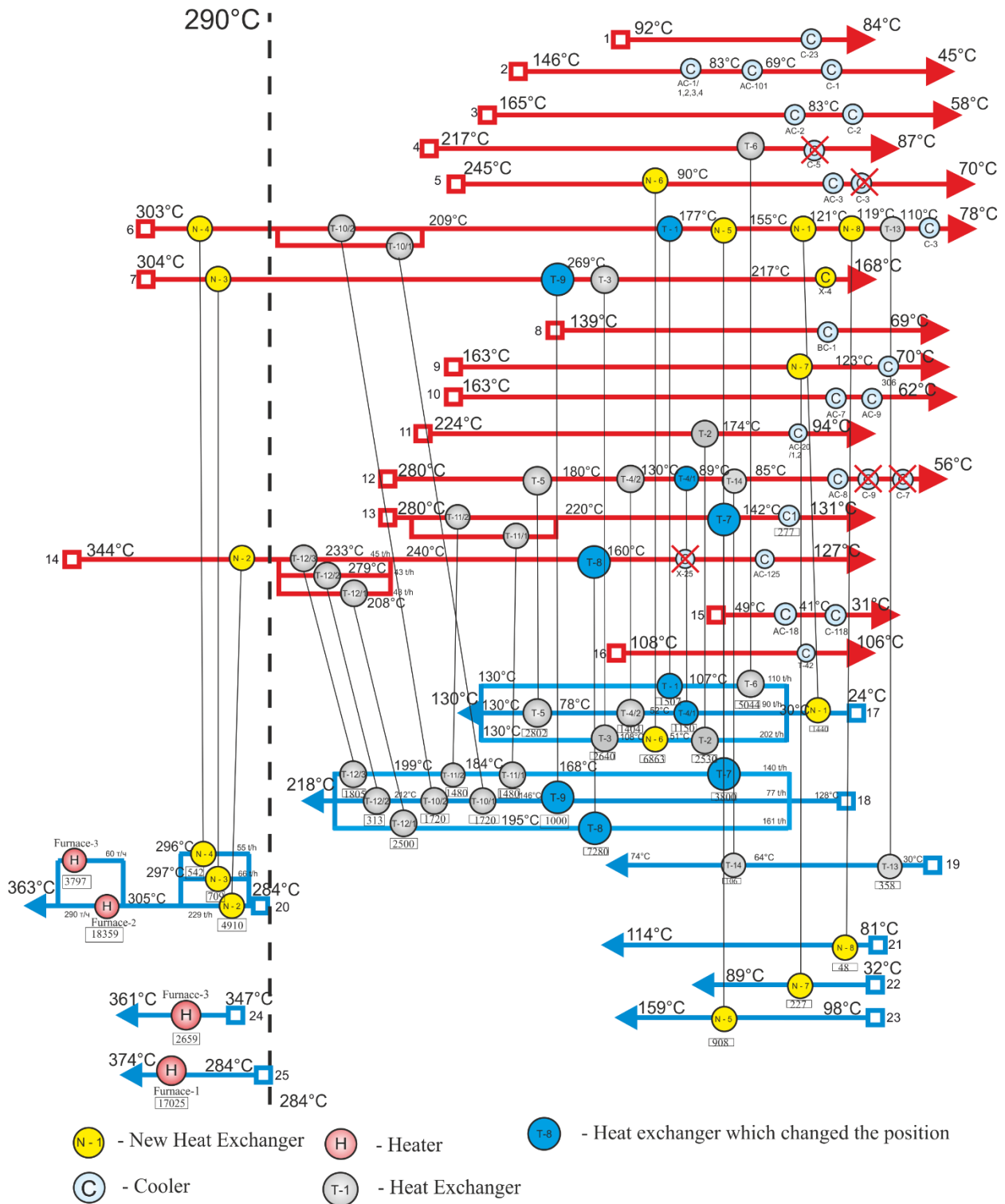


Рис. 5. Сеточная диаграмма проекта модернизации  
 (Новые теплообменники выделены желтым цветом;  
 теплообменники, изменившие положение, выделены синим цветом)

Fig. 5. Grid diagram of the modernization project  
 (New heat exchangers are highlighted in yellow;  
 heat exchangers that have changed position are highlighted in blue color)

С использованием ПО “Pinch-SELOOP” разработан проект реконструкции существующей системы теплообмена установки производства этилбензола. Суммарная экономия пара составила 3,8 Гкал/ч, чистый дисконтированный доход (NPV) при совмест-

ной реализации проектов составил 501 млн. рублей при горизонте планирования 10 лет. Дисконтированный срок окупаемости (DPP) составил 4 года и 1 месяц с начала реализации проекта. Для установки ЭЛОУ-АВТ-6 разработан проект реконструкции системы теплообмена с увеличением рекуперации на 41 МВт и экономией 8,2 т/ч природного газа, NPV проекта превысил 1,5 млрд. руб. Для установки гидроочистки Л-24/8с с помощью “Pinch-SELOOP” разработан проект, реализация которого позволит сократить потребление природного газа на 0,7 т/ч при NPV 68 млн. руб.

Реализация данных проектов позволила сократить выбросы парниковых газов на ~24 т/ч CO<sub>2экв</sub> (210 тысяч тонн CO<sub>2экв</sub> ежегодно).

Достигнутый эффект в натуральном и денежном выражении показал эффективность разработанных алгоритмов и созданного на их основе ПО “Pinch-SELOOP”.

У представленных алгоритмов и ПО, построенного на их основе “Pinch-SELOOP”, нет прямых конкурентов, которые в полной степени закрывали бы все предлагаемые возможности. Для нефтеперерабатывающей отрасли существует решение компании Solomon LLC для проведения бенчмаркинга энергоэффективности. Решение, предлагаемое компанией Solomon LLC – Индекс энергоемкости ЕИИ® – Energy Intensity Index™, используется для статистического сравнения (бенчмаркинга) между участниками исследования и не позволяет осуществлять реальное целеполагание, а также не имеет возможности без проведения инструментального обследования рассчитать экономические показатели по направлению повышения энергоэффективности. Также данное решение не предоставляет аналогичного заявленному решению функционала и детализации.

Предлагаемое на рынке ПО, например, Aspen Energy Analyzer, основано на классических принципах пинч-анализа и не учитывает возможные ограничения при проектировании РТС, что существенно влияет на возможность и эффективность его применения.

### Примечания

1. Chemical Engineering Transactions / M. V. Kanischev, L. M. Ulyev, Chibisov R. E., Vasilyev M. A. Benchmarking for Refinery Units // 2018. Vol. 70. P. 1099–1104. DOI: 10.3303/CET1870184
2. Smith R. Chemical Process Design and Integration. 2<sup>nd</sup> Edition. 2016, Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK. 928 p.
3. Manijeh Alipour, Kazem Zare, Heresh Seyedi. A multi-follower bilevel stochastic programming approach for energy management of combined heat and power micro-grids // Energy. 2018. Vol. 149. P. 135–146.
4. Hür Büttin, Ivan Kantor, François Maréchal. A heat integration method with multiple heat exchange interfaces // Energy. 2018. Vol. 152. P. 476–488.
5. Hohmann E. C. Optimum networks for heat exchange // PhD thesis. Los Angeles, USA : University of Southern California, 1971.
6. Linnhoff B., Flower J. R. Synthesis of heat exchanger networks: I. Systematic generation of energy optimal networks // AIChE J. 1978. Vol. 24. P. 633–642.
7. Flower J. R., Linnhoff B. Synthesis of heat exchanger networks – 2. Evolutionary generation of networks with various criteria of optimality // AIChE J. 1978. Vol. 24. P. 642–654.
8. Linnhoff B. Thermodynamic analysis of the cement burning process (Thermodynamische Analyse des Zementbrennprozesses), Diploma work // Abteilung IIIa, ETHZurich. 1972 (in German).
9. Umeda T., Itoh J., Shiroko K. Heat exchanger systems synthesis // Chem. Eng. Prog. 1978. Vol. 74. P. 70–76.
10. Optimal water allocation in a petroleum refinery / N. Takama, T. Kuriyama, K. Shiroko, T. Umeda // Comput. Chem. Eng. 1980. Vol. 4. P. 251–258.
11. Itoh J., Shiroko K., Umeda T. Extensive applications of the T-Q diagram to heat integrated system synthesis // Comput. Chem. Eng. 1986. Vol. 10. P. 59–66.
12. Linnhoff B., Hihdmarsh E. The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks // Chemical Engineering Science. 1983. Vol. 38, No. 3. P. 745–763.
13. A user guide on process integration for the efficient use of energy / B. Linnhoff, D. W. Townsend [et al.] // IChemE, Rugby, UK. 1982 (New editions 1991, 1994, 2007). 247 p.
14. Papoulias S. A., Grossmann I. E. A structural optimization approach in process synthesis – III. Total processing systems // Comput. Chem. Eng. 1983. Vol. 7. P. 723–734.
15. Duran M. A., Grossmann I. E. Simultaneous optimization and heat integration of chemical processes // AIChE J. 1986. Vol. 32. P. 123–138.

16. Yee T. F., Grossmann I. E. Optimization models for heat integration – II. Heat exchanger network synthesis // *Comput. Chem. Eng.* 1990. Vol. 14. P. 1165–1184.
17. Sorsak A., Kravanja Z. Simultaneous MINLP synthesis of heat and power integrated heat exchanger network // *Comput. Chem. Eng.* 1999. Vol. 23. P. 143–147.
18. Mathematical programming model for heat exchanger networks synthesis including detailed heat-exchanger designs. 2. Networks synthesis / F. T. Mizutani, F. L. P. Pessoa, E. M. Queiroz, S. Hauan, I. E. Grossmann // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2003. Vol. 42. P. 4019–4027.
19. Sorsak A., Kravanja Z. Simultaneous MINLP synthesis of heat exchanger networks comprising different exchanger types // *Comput. Chem. Eng.* 2002. Vol. 26, No. 4–5. P. 599–615.
20. Chen Qi, Grossmann I. E. Recent developments and challenges in optimization-based process synthesis // *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*. 2017. Vol. 8, No. 6. P. 249–283.
21. Akpomemie M. O., Smith R. Retrofit of heat exchanger networks without topology modifications and additional heat transfer area // *Applied Energy*. 2015. Vol. 159, No. 12. P. 381–390.
22. Process integration of benzene distillation unit at the coke plant / L. Tovazhnyansky, P. Kapustenko, L. Ulyev, S. Boldyryev, M. Vasilyev // *Proceedings of 19<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering – Prague. Czech Republic: CHISA. 28 August – 1 September 2010.* P. 1487.
23. Ulyev L. M., Kapustenko P. A., Vasilyev M. A. Total Site Integration for Coke Oven Plant // *Chemical Engineering Transaction*. 2013. Vol. 35. P. 235–240.
24. Ul'ev L. M., Vasil'ev M. A. Heat and Power Integration of Processes for the Refinement of Coking Products // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2015, Vol. 49, No. 5. P. 676–687.
25. Total Site Integration of light hydrocarbons separation process / L. Ulyev, M. Vasilyev, A. Maatouk, N. Duic, A. Khusanov // *Chemical Engineering Transaction*. 2016. Vol. 52. P. 1–6.
26. Process integration of crude oil distillation with technological and economic restrictions / M. Vasiliev, L. Ulyev, M. Kanishev, S. Boldyryev // *12<sup>th</sup> Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, SDEWES2017*. 2017. P. 46.
27. Benchmarking for Refinery Units / Maxim V. Kanishev, Leonid M. Ulyev, Roman E. Chibisov, Mikhail A. Vasilyev // *Chemical Engineering Transaction*. 2018. Vol. 70. P. 1099–1104.
28. Межцеховая теплоэнергетическая интеграция на газоперерабатывающих предприятиях / В. П. Мешалкин, Л. М. Ульев, М. В. Канищев, Р. Е. Чибисов, М. А. Васильев // *Энергосбережение и Водоподготовка*. 2019. № 3. С. 19–24.
29. Heat Integration of an Industrial Unit for the Ethylbenzene Production / Leonid M. Ulyev, Maksim V. Kanishev, Roman E. Chibisov, Mikhail A. Vasilyev // *Energies*. 2021. No. 13.
30. Чибисов Р. Е., Канищев М. В. Интеграция тепловых процессов на установке гидроочистки прямых средних дистиллятов Л-24-6 // *Перспективы науки*. 2019. № 3 (114). С. 187–193.
31. Интеграция тепловых процессов на установке гидроочистки дизельного топлива Л-24/8с / Р. Е. Чибисов, М. В. Канищев, В. П. Мешалкин, Л. М. Ульев, М. А. Васильев // *Энергосбережение и Водоподготовка*. 2019. № 2 (118). С. 31–36.
32. Теплоэнергетическая интеграция на установке гидроочистки дистиллятов / Р. Е. Чибисов, М. В. Канищев, В. П. Мешалкин, Л. М. Ульев, М. А. Васильев // *Энергосбережение и Водоподготовка*. 2019. № 5 (121). С. 9–14.
33. Ulyev Leonid M., Kanishev Maxim V., Chibisov Roman E. Determination of Energy Efficiency Features of Oil Refinery Units and Their Complexes // *Chemical Engineering Transactions*. 2020. Vol. 81. P. 283–288.

## References

1. *Chemical Engineering Transactions / M. V. Kanishev, L. M. Ulyev, Chibisov R. E., Vasilyev M. A. Benchmarking for Refinery Units // 2018. Vol. 70. P. 1099–1104. DOI: 10.3303/CET1870184*
2. Smith R. *Chemical Process Design and Integration*. 2<sup>nd</sup> Edition. 2016, Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK. 928 p.
3. Manijeh Alipour, Kazem Zare, Heresh Seyedi. A multi-follower bilevel stochastic programming approach for energy management of combined heat and power micro-grids // *Energy*. 2018. Vol. 149. P. 135–146.
4. Hür Bütün, Ivan Kantor, François Maréchal. A heat integration method with multiple heat exchange interfaces // *Energy*. 2018. Vol. 152. P. 476–488.
5. Hohmann E. C. *Optimum networks for heat exchange // PhD thesis. Los Angeles, USA : University of Southern California, 1971.*
6. Linnhoff B., Flower J. R. Synthesis of heat exchanger networks: I. Systematic generation of energy optimal networks // *AIChE J.* 1978. Vol. 24. P. 633–642.
7. Flower J. R., Linnhoff B. Synthesis of heat exchanger networks – 2. Evolutionary generation of networks with various criteria of optimality // *AIChE J.* 1978. Vol. 24. P. 642–654.
8. Linnhoff B. Thermodynamic analysis of the cement burning process (Thermodynamische Analyse des Zementbrennprozesses), Diploma work // *Abteilung IIIa, ETHZurich. 1972 (in German).*
9. Umeda T., Itoh J., Shiroko K. Heat exchanger systems synthesis // *Chem. Eng. Prog.* 1978. Vol. 74. P. 70–76.
10. Optimal water allocation in a petroleum refinery / N. Takama, T. Kuriyama, K. Shiroko, T. Umeda // *Comput. Chem. Eng.* 1980. Vol. 4. P. 251–258.
11. Itoh J., Shiroko K., Umeda T. Extensive applications of the T-Q diagram to heat integrated system

- synthesis // Comput. Chem. Eng. 1986. Vol. 10. P. 59–66.
12. Linnhoff B., Hihdmarsh E. The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks // Chemical Engineering Science. 1983. Vol. 38, No. 3. P. 745–763.
13. A user guide on process integration for the efficient use of energy / B. Linnhoff, D. W. Townsend [et al.] // IChemE, Rugby, UK. 1982 (New editions 1991, 1994, 2007). 247 p.
14. Papoulias S. A., Grossmann I. E. A structural optimization approach in process synthesis – III. Total processing systems // Comput. Chem. Eng. 1983. Vol. 7. P. 723–734.
15. Duran M. A., Grossmann I. E. Simultaneous optimization and heat integration of chemical processes // AIChE J. 1986. Vol. 32. P. 123–138.
16. Yee T. F., Grossmann I. E. Optimization models for heat integration – II. Heat exchanger network synthesis // Comput. Chem. Eng. 1990. Vol. 14. P. 1165–1184.
17. Sorsak A., Kravanja Z. Simultaneous MINLP synthesis of heat and power integrated heat exchanger network // Comput. Chem. Eng. 1999. Vol. 23. P. 143–147.
18. Mathematical programming model for heat exchanger networks synthesis including detailed heat-exchanger designs. 2. Networks synthesis / F. T. Mizutani, F. L. P. Pessoa, E. M. Queiroz, S. Hauan, I. E. Grossmann // Ind. Eng. Chem. Res. 2003. Vol. 42. P. 4019–4027.
19. Sorsak A., Kravanja Z. Simultaneous MINLP synthesis of heat exchanger networks comprising different exchanger types // Comput. Chem. Eng. 2002. Vol. 26, No. 4–5. P. 599–615.
20. Chen Qi, Grossmann I. E. Recent developments and challenges in optimization-based process synthesis // Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering. 2017. Vol. 8, No. 6. P. 249–283.
21. Akpomemie M. O., Smith R. Retrofit of heat exchanger networks without topology modifications and additional heat transfer area // Applied Energy. 2015. Vol. 159, No. 12. P. 381–390.
22. Process integration of benzene distillation unit at the coke plant / L. Tovazhnyansky, P. Kapustenko, L. Ulyev, S. Boldyryev, M. Vasilyev // Proceedings of 19<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering – Prague. Czech Republic: CHISA. 28 August – 1 September 2010. P. 1487.
23. Ulyev L. M., Kapustenko P. A., Vasilyev M. A. Total Site Integration for Coke Oven Plant // Chemical Engineering Transaction. 2013. Vol. 35. P. 235–240.
24. Ul'ev L. M., Vasil'ev M. A. Heat and Power Integration of Processes for the Refinement of Coking Products // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2015, Vol. 49, No. 5. P. 676–687.
25. Total Site Integration of light hydrocarbons separation process / L. Ulyev, M. Vasilyev, A. Maatouk, N. Duic, A. Khusanov // Chemical Engineering Transaction. 2016. Vol. 52. P. 1–6.
26. Process integration of crude oil distillation with technological and economic restrictions / M. Vasiliev, L. Ulyev, M. Kanishev, S. Boldyryev // 12<sup>th</sup> Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, SDEWES2017. 2017. P. 46.
27. Benchmarking for Refinery Units / Maxim V. Kanishev, Leonid M. Ulyev, Roman E. Chibisov, Mikhail A. Vasilyev // Chemical Engineering Transaction. 2018. Vol. 70. P. 1099–1104.
28. Total site heat integration at gas separation plants / V. P. Meshalkin, L. M. Ulyev, M. V. Kanishev, R. E. Chibisov, M. A. Vasilyev // Energy Saving and Water Treatment. 2019. No. 3. P. 19–24.
29. Heat Integration of an Industrial Unit for the Ethylbenzene Production / Leonid M. Ulyev, Maksim V. Kanishev, Roman E. Chibisov, Mikhail A. Vasilyev // Energies. 2021. No. 13.
30. Chibisov R. E., Kanishev M. V. Heat integration of diesel fuel hydro treatment L-24-6 unit // Perspectives of Science. 2019. No. 3 (114). P. 187–193.
31. Heat integration of diesel fuel hydrotreating unit L-24/8c / R. E. Chibisov, M. V. Kanishev, V. P. Meshalkin, L. M. Ulyev, M. A. Vasilyev // Energy Saving and Water Treatment. 2019. No. 2 (118). P. 31–36.
32. Heat integration of the distillates hydrotreatment process / R. E. Chibisov, M. V. Kanishev, V. P. Meshalkin, L. M. Ulyev, M. A. Vasilyev // Energy Saving and Water Treatment. 2019. No. 5 (121). P. 9–14.
33. Ulyev Leonid M., Kanishev Maxim V., Chibisov Roman E. Determination of Energy Efficiency Features of Oil Refinery Units and Their Complexes // Chemical Engineering Transactions. 2020. Vol. 81. P. 283–288.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

*Статья поступила в редакцию 01.03.2024; одобрена после рецензирования 11.03.2024; принята к публикации 12.03.2024.*

*The authors declare no conflicts of interests.*

*The article was submitted 01.03.2024; approved after reviewing 11.03.2024; accepted for publication 12.03.2024.*