

УДК 665.6:62–021.1; <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2026-2.19>

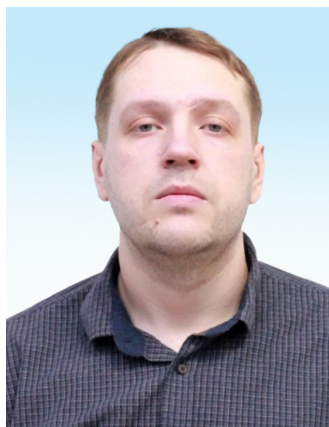
<https://orcid.org/0009-0009-2090-9143>

<https://orcid.org/0000-0003-3083-5255>

<https://orcid.org/0000-0001-6202-3951>

<https://orcid.org/0000-0003-0545-5912>

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАМЕДЛЕННОГО КОКСОВАНИЯ НЕФТИ НА ОСНОВЕ ПИНЧ-АНАЛИЗА



Я. СЕРГЕЕВС¹,
докторант,
sergeevs_yakobs@mail.ru



Р.М. ДЮСОВА²,
кандидат технических наук,
постдокторант,
rizagul.dyussova@gmail.com



Г.Ж. СЕЙТЕНОВА²,
кандидат химических наук,
gainiseitenova@gmail.com



Е.А. ЖАКМАНОВА²,
докторант,
ekaterina.zakmanova1998@gmail.com

¹ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТ,
Республика Казахстан, 140008, г. Павлодар, ул. Ломова, 64

²ЕВРАЗИЙСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Л.Н. ГУМИЛЕВА,
Республика Казахстан, Z01A3D7, Астана, ул. Каныш Сатпаев, 2

В статье представлены результаты оптимизации схемы предварительного нагрева сырья установки замедленного коксования с использованием методологии пинч-анализа. Целью работы является повышение энергоэффективности процесса рекуперации тепла без капитальных затрат на новое теплообменное оборудование и реконструкцию печи.

В ходе исследования предложены инженерные решения, позволившие минимизировать количество дополнительных воздушных холодильников при сохранении существующей конфигурации оборудования. Установлено, что в результате оптимизации тепловая мощность системы подогрева увеличилась с 10,4 до 14,6 МВт. Практическая значимость работы подтверждается потенциальным экономическим эффектом в размере 160 млн тенге в год.

Дополнительно выявлено положительное влияние на работу основной фракционирующей колонны за счет интенсификации теплосъема во втором циркуляционном орошении достигнуто более четкое разделение легкого и тяжелого газойлей. Полученные результаты доказывают эффективность гибридного моделирования для оптимизации действующих нефтеперерабатывающих производств.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *нефтепереработка, оптимизация технологического процесса, энергоэффективность, энергопотребление, рекуперация, пинч-анализ, теплообменное оборудование.*

ПИНЧ-ТАЛДАУ НЕГІЗІНДЕ МҰНАЙДЫ БАЯУ КОКСТЕУДІҢ ЭНЕРГИЯ ТИІМДІЛІГІН АРТТЫРУ

Я. СЕРГЕЕВС¹, докторант, sergeevs_yakobs@mail.ru

Р.М. ДЮСОВА², техника ғылымдарының кандидаты, постдокторант, rizagul.dyussova@gmail.com

Г.Ж. СЕЙТЕНОВА², химия ғылымдарының кандидаты, gainiseitenova@gmail.com

Е.А. ЖАКМАНОВА², докторант, ekaterina.zakmanova1998@gmail.com

¹ТОРАЙҒЫРОВ УНИВЕРСИТЕТІ,
Қазақстан Республикасы, 140008, Павлодар қ., Ломов көш., 64

²Л.Н. ГУМИЛЕВ АТЫНДАҒЫ ЕУРАЗИЯ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ,
Қазақстан Республикасы, Z01A3D7, Астана қ., Қаныш Сәтбаев көш., 2

Мақалада пинч-талдау әдістемесін қолдану арқылы баяу кокстеу қондырғысының шикізатын алдын ала қыздыру схемасын оңтайландыру нәтижелері берілген. Жұмыстың мақсаты жаңа жылу алмасу жабдықтарын енгізбей және қолданыстағы пешті сақтай отырып, жылу рекуперациясы процесінің энергия тиімділігін арттыру.

Зерттеу барысында қосымша ауа тоңазытқыштарының санын азайтуға мүмкіндік беретін инженерлік шешімдер ұсынылды. Оңтайландыру нәтижесінде қыздыру жүйесінің жылу қуаты 10,4 МВт-тан 14,6 МВт-қа дейін артқаны анықталды. Жұмыстың практикалық маңыздылығы жылына шамамен 160 млн теңге көлеміндегі әлеуетті экономикалық тиімділікпен расталады.

Сонымен қатар, екінші циркуляциялық суарудағы жылу алу тиімділігін арттыру есебінен жеңіл және ауыр газойльдердің нақты бөлінуін қамтамасыз ететін негізгі фракциялау бағанасының жұмысына оң әсері анықталды.

ТҮЙІН СӨЗДЕР: *мұнай өңдеу, технологиялық процессті оңтайландыру, энергия тиімділігі, энергия тұтыну, рекуперация, пинч-талдау, жылуалмастырғыш жабдық.*

ENERGY EFFICIENCY ENHANCEMENT OF DELAYED PETROLEUM COKING VIA PINCH ANALYSIS

Ya. **SERGEEVS**¹, doctoral student, sergeevs_yakobs@mail.ru

R.M. DYUSSOVA², candidate of technical sciences, postdoctoral researcher, rizagul.dyussova@gmail.com

G.Zh. SEITENOVA², candidate of chemical sciences, gainiseitenova@gmail.com

Ye.A. ZHAKMANOVA², doctoral student, ekaterina.zakmanova1998@gmail.com

¹TORAIGHYROV UNIVERSITY,
Republic of Kazakhstan, 140008, Pavlodar, st. Lomova, 64

²L.N. GUMILYOV EURASIAN NATIONAL UNIVERSITY,
Republic of Kazakhstan, Z01A3D7, Astana, st. Kanysh Satpayev, 2

This paper presents the results of optimizing the feed preheating circuit of a delayed coking unit using pinch analysis methodology. The aim of the study is to enhance the energy efficiency of the heat recovery process without installing new heat exchange equipment or modifying the existing furnace.

During the research, engineering solutions were proposed to minimize the number of additional air coolers while maintaining the current equipment configuration. It was established that the optimization increased the thermal capacity of the preheating system from 10.4 to 14.6 MW. The practical significance of the work is confirmed by a potential economic effect of approximately 160 million tenge per year.

Additionally, a positive impact on the operation of the main fractionating column was identified: enhanced heat removal in the second circulating reflux ensured a sharper separation of light and heavy gas oils. The results demonstrate the effectiveness of hybrid modeling for optimizing existing refinery operations.

KEYWORDS: oil refining, process optimization, energy efficiency, energy consumption, heat recovery, pinch analysis, heat-exchange equipment.

Введение. Установка замедленного коксования является одной из основных конверсионных установок нефтеперерабатывающего завода и предназначена для производства нефтяного кокса и жидких нефтепродуктов из тяжелых нефтяных остатков. В качестве тяжелых нефтяных остатков применяется гудрон, иногда в сырье вовлекается затемненный продукт вакуумных колонн (слоп), а также тяжелый газойль каталитического крекинга. Кроме кокса на установке получают жирный газ коксования, бензин коксования, легкий и тяжелый газойль коксования [1-3].

Установка замедленного коксования (УЗК) является крупным потребителем энергоресурсов, в связи с чем задача оптимизации энергопотребления установки является одной из приоритетных в энергоменеджменте нефтеперерабатывающих предприятий [4-5].

Установки замедленного коксования, проектировавшиеся и строившиеся в советский период, были продуктом своего времени с соответствующей ресурсной логикой, а стоимость энергоресурсов формировалась нерыночными механизмами. В таких условиях не существовало экономических стимулов для значительных капиталовложений в энергосберегающие технологии на этапе проектирования. Кроме того, сами приоритеты на этапе проектирования были другими – основными зада-

чами при строительстве были выполнение плана по объёму производства (главным образом, кокса для электродной и алюминиевой промышленности) и надёжность. Вопросы себестоимости продукции и операционных затрат не являлись приоритетными ввиду совершенно другой экономической конъюнктуры.

В результате многие советские УЗК, часть из которых до сих пор работает в странах СНГ, представляют собой морально и физически устаревшие производства с высокими удельными расходами энергии на тонну сырья. Их модернизация сегодня упирается в необходимость глубокой реконструкции с установкой систем теплоинтеграции, современных средств КИПиА и утилизации тепла вторичных энергоресурсов, что требует высоких капитальных инвестиций [6-8].

Одним из ключевых направлений повышения энергетической эффективности установки замедленного коксования является повышение эффективности использования имеющихся тепловых потоков с целью сокращения потребления внешних энергоносителей. Это достигается путем оценки существующего положения и реконфигурации технологических схем (при необходимости). Наиболее распространенным способом для решения таких задач является методология пинч-анализа [9-11].

Материалы и методы исследования

Методология пинч-анализа была разработана Б. Линнхоффом в 1980-х годах. Методология пинч анализа – термодинамический метод оптимизации энергопотребления промышленных процессов. Он минимизирует использование внешних теплоносителей, максимизируя внутреннюю рекуперацию тепла через анализ «горячих» и «холодных» потоков, определяя точку пинча – минимальную разницу температур [12-13].

Данный метод широко используется при модернизации и реконструкции действующих производств, поскольку позволяет максимально использовать существующее оборудование с минимальными вложениями [14-17].

В качестве прикладной среды, в которой проводился пинч-анализ является среда инженерной моделирования Aspen Hysys v.12.1

Результаты и обсуждение

В данной статье рассматривается технологический процесс установки замедленного коксования типа 21–10/9, разработанного БашНИИ НП (Башгипронефтехим). Проектная годовая производительность типовой установки по сырью – 600 тыс. тонн в год.

Схема установки принята двухпоточной по блоку коксовых камер и однопоточной по ректификации, по системе обработки и транспорта кокса. Заполнение камер коксом и выгрузка кокса из коксовых камер производится периодически, коксовые камеры оборудованы уровнемерами для контроля высоты кокса и пенного слоя, что позволяет увеличить коэффициент использования и безопасность производства.

Схема процесса приведена на *рисунке 1*:

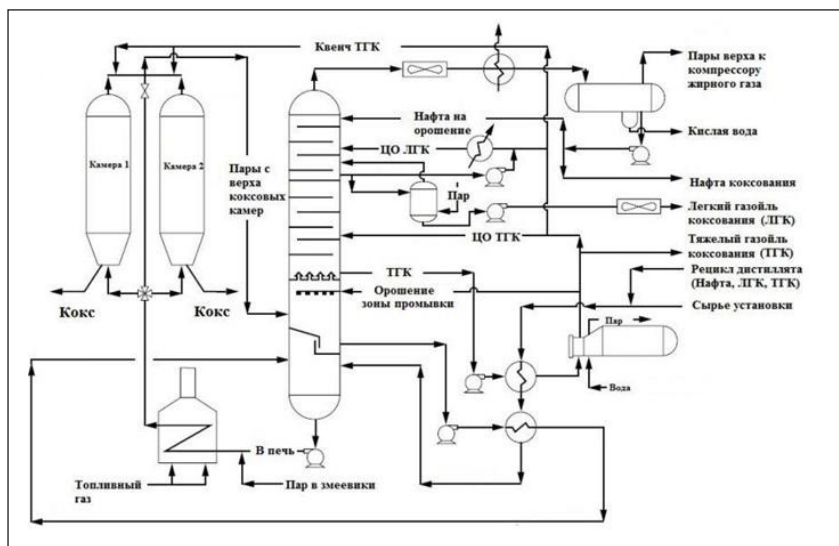


Рисунок 1 – Схема процесса замедленного коксования

Сырье коксования – гудрон или гудрон в смеси с тяжелым остатком каталитического крекинга поступает на установку в резервуарный парк резервуар Р-3. Из резервуара Р-3 - на прием центробежных сырьевых насосов Н-1А, Н-2А или с паровым приводом Н-1, Н-2 (ПДГ 125/30-НГ).

Далее первичное сырье последовательно прокачивается через трубное пространство сдвоенных теплообменников Т-71, Т-72, Т-73, Т-74, Т-75, Т-76, Т-77 нагреваясь до 270°С за счет утилизации тепла циркуляционных орошений (ЦО-1, ЦО-2), тяжелого и легкого газойлей коксования. После теплообменника Т-77 первичное сырье делится на два потока и поступает в печь нагрева первичного сырья П-2. Печь П-2 оборудована пароперегревателем для получения перегретого пара. Водяной пар давлением 12 ата из сети завода перегревается в пароперегревателе печи П-2. Перегретый водяной пар из пароперегревателя печи П-2 подается в отпарные колонны К-2, К-3.

Циркуляционное орошение ЦО-1 с аккумулятора легкого газойля колонны К-1 насосом Н-7(Н-7А) подается на охлаждение в теплообменники Т-76, Т-75, Т-72, где за счет передачи тепла первичному сырью, происходит его охлаждение. ЦО-1 после холодильников Х-8/1, Х-8/2 подается на тарелку 17 колонны К-1. Балансовое количество легкого газойля из аккумулятора легкого газойля колонны К-1 выводится на верхнюю тарелку отпарной колонны К-2.

Циркуляционное орошение ЦО-2 из аккумулятора тяжелого газойля колонны К-1 забирается насосом Н-71(Н-71А), подается в кипятильник стабилизатора бензина Т-3, далее в теплообменники Т-77, Т-74, где отдает тепло на нагрев первичного сырья и возвращается в колонну К-1 на 23 тарелку.

Первичное сырье установки замедленного коксования (гудрон) направляется через трубное пространство сдвоенных теплообменников Т-71, Т-72, Т-73, Т-74, Т-75, Т-76, Т-77 для предварительного нагрева перед печью нагрева первичного

сырья П-2 за счет утилизации тепла циркуляционных орошений (ЦО-1, ЦО-2), а также тяжелого и легкого газойлей коксования.

Согласно проекту установки, температура нагретого сырья после теплообменника Т-77 должна достигать 270 °С, однако, ввиду более низких фактических температур ЦО-1 (210 °С) по сравнению с проектными (290 °С), теплообменники Т-75, Т-76 находятся в зоне равных температур охлаждаемых и нагреваемых потоков (температурного кросса), из-за чего обладают крайне низкой эффективностью.

Низкая эффективность теплообменников влияет на тепловой баланс установки, приводя к недостаточно эффективному теплосъему избыточного тепла колонны, а также сниженной температуре сырья на входе в печь нагрева первичного сырья. Так, недостаточный теплосъем создает сложности с гибкостью ведения технологического режима, затрудняя управление ректификационной колонной, а снижение температуры сырья приводит к увеличенному расходу топлива.

Теплотехнический анализ технологической схемы

Существующая схема обвязки группы нагрева первичного сырья представлена на рисунке 2:

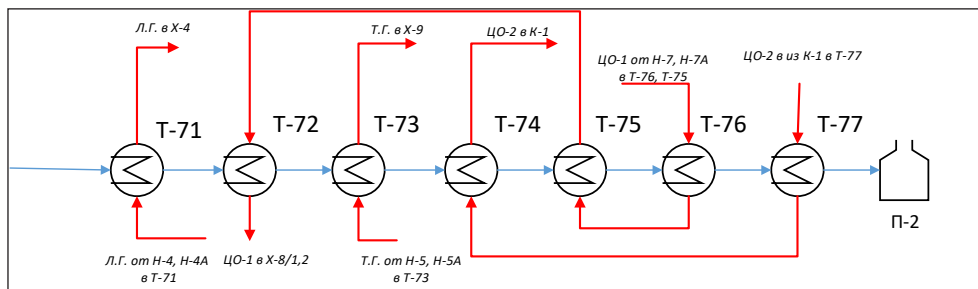


Рисунок 2 – Схема обвязки группы нагрева первичного сырья

Общая нагрузка блока теплообменников составляет ~ 10,4 МВт.

В качестве основного хладагента выступает первичное сырье – гудрон, поступающее на установку с температурой 120 °С. В качестве теплоносителей выступают продукты основной колонны фракционирования К-1, а также циркуляционные орошения.

Как определено ранее, основной причиной низкой эффективности существующей схемы нагрева является температурный кросс на теплообменниках Т-75, Т-76, при котором температуры хладагента и теплоносителя практически равны, а полезной передачи тепла не происходит. Нагрузка теплообменника Т-75 составляет 86 кВт, Т-76 – 1,4 МВт. Для оценки теплотехнических характеристик был проведен расчет в среде технологического моделирования Aspen Hysys v11. Характеристики существующей схемы нагрева приведены в *таблице 1*:

Таблица 1 – характеристики существующей схемы нагрева Т-71/Т-77:

Наименование	Q		K	LMTD	A		A факт	Комментарий
	кДж/ч	Вт	Вт/К*м2	оС	м2			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
T-71	4 476 000	1 243 333	120	50,25	206	268	428	Соответствует
T-72	6 124 000	1 701 111	120	55,6	255	331	428	Соответствует
T-73	11 050 000	3 069 444	120	69	371	482	428	Соответствует
T-74	7 745 000	2 151 389	120	59	304	395	428	Соответствует
T-75	313 000	86 944	120	-13	-56	-72	428	Пересечение температур
T-76	5 261 000	1 461 389	120	28,5	427	555	428	Пересечение температур
T-77	1 632 000	453 333	120	66	57	74	428	Соответствует

Пояснение к столбцам таблицы 1:

№ столбца	Описание
1	Номер технологической позиции теплообменника в технологической схеме
2	Рассчитанная в среде Aspen Hysys нагрузка теплообменника в кДж/ч
3	Пересчет значения, полученного в столбце 2, в МВт
4	Коэффициент теплопередачи
5	Log Mean Temperature Difference (LMTD) – средний логарифмический температурный напор
6	Требуемая площадь теплопередачи
7	Требуемая площадь теплопередачи с 30% запасом поверхности
8	Фактическая площадь поверхности (по паспортным данным)
9	Комментарий

Для увеличения эффективности теплопередачи был проведен пинч-анализ установки, а также проанализировано материальное исполнение теплообменных аппаратов. Так, определено, что первые по ходу движения теплообменники ЦО-2 и тяжелого газойля (с температурой отбора фракции более 300 °С) изготовлены из жаропрочной стали. Для сокращения сроков реализации проекта в качестве стартового условия было принято, что данные теплообменники не подлежат физическому изменению местоположения при переобвязке. По результату оптимизации технологической схемы предложен следующий вариант обвязки, приведенный на рисунке 3:

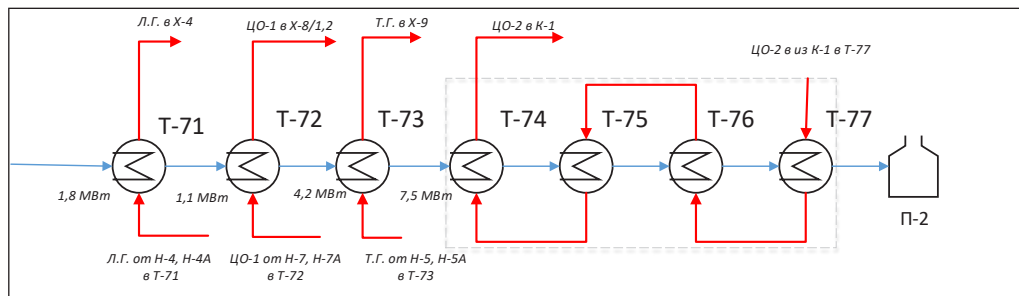


Рисунок 3 – Предлагаемая схема нагрева

В данной конфигурации технологической схемы нагрева первичного сырья охлаждение ЦО-2 осуществляется последовательно через теплообменники Т-77, Т-76, Т-75, Т-74. Конфигурация теплообменников Т-71, Т-72, Т-73 оставлена без изменений. В результате увеличения площади теплообменников Т-77 / Т-74 тепловая нагрузка по ЦО-2 увеличивается с 2,6 МВт до 7,4 МВт, общая тепловая схемы в данной конфигурации ожидается на уровне 14,6 МВт. Сводная характеристика приведена в *таблице 2*:

Таблица 2 – Характеристики новой схемы нагрева Т-71/Т-77:


Наименование	Q		K	LMTD	A		A факт	Комментарий
	кДж/ч	Вт	Вт/К*м ²	°С	м ²			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Т-71	6 777 075	1 882 521	120	45	348	452	428	Соответствует
Т-72	4 201 576	1 167 104	120	23	423	550	428	Соответствует
Т-73	14 996 969	4 165 825	120	61	569	740	428	Соответствует
Т-74 / Т-77	26 855 478	7 459 855	120	40	1533	1992	428	Соответствует

Закключение и выводы

По итогам оптимизации технологической схемы предварительного нагрева сырья установки с рекуперацией тепла, при использовании методологии пинч-анализа удалось достигнуть следующих положительных результатов:

1. Сохранить существующую печь минимизировать количество дополнительных воздушных холодильников.
2. Улучшить эффективность существующей системы предварительного нагрева без ввода нового теплообменного оборудования.
3. Увеличить тепловая мощность системы подогрева с 10,4 МВт до 14,6 МВт, что эквивалентно 15,12 ГДж/ч. При стоимости тепловой энергии ~ 1330 тенге за ГДж и работе технологической установки 8000 часов в год, потенциальный экономический эффект составляет ~ 160 млн тенге в год.

Помимо этого, данное техническое решение положительно влияет на работу основной фракционирующей колонны продуктов коксования, улучшая четкость деления между легким и тяжелым газойлем коксования за счет улучшенного теплосъема тепла второго циркуляционного орошения.

Данная схема подлежит промышленной апробации, а также может быть использована в качестве успешного кейса проведенного пинч – анализа на промышленной установке. 

Источник финансирования. Данное исследование финансируется в рамках проекта AP23487495 «Повышение ресурсоэффективности и энергосбережения технологии приготовления продуктов нефтепереработки методом гибридного моделирования», 2024-2026 гг.

ЛИТЕРАТУРА

1. The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks (1983); DOI: 10.1016/0009-2509(83)80112-5
2. New directions in the implementation of Pinch Methodology (PM) (2018); DOI: 10.1016/j.rser.2018.09.030
3. Coupling design of interunit heat integration in an industrial crude distillation plant using pinch analysis (2017); DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.02.015
4. The Role of Pinch Analysis for Industrial ORC Integration (2017); DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.189
5. An advanced comprehensive graphical tool with shifted stream temperatures to efficiently design cost-effective heat exchanger network (2018); DOI: 10.1016/j.energy.2017.12.138
6. Feasibility assessment of a novel refrigeration FCC gas plant driven by self waste heat (2018); DOI: 10.1016/j.energy.2017.12.140
7. Heat and Power Pinch for Process Integration targeting in hybrid energy systems (2021); DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112305
8. An integrated Pinch Analysis framework for low CO₂ emissions industrial site planning (2017); DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.023
9. Pinch and exergy assessment of an innovative hydrogen and methane purification process configuration based on solar renewable energy (2024); DOI: 10.1016/j.fuel.2023.130391
10. Applying pinch and exergy analysis for energy efficient design of diesel hydrotreating unit (2019); DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.321
11. Integration of organic Rankine open cycles to alkanes fractional distillation: Process design and techno-economic assessment (2023); DOI: 10.1016/j.ccep.2023.109554
12. A new retrofit approach to the absorption-stabilization process for improving energy efficiency in refineries (2017); DOI: 10.1016/j.energy.2016.10.141
13. Optimized heat exchanger network design for a phthalic anhydride plant using pinch technology: A Maximum Energy Recovery approach with economic analysis (2024); DOI: 10.1016/j.rineng.2024.103438
14. Energy Integrated Distillation Column Sequence by Driving Force Method and Pinch Analysis for Five Components Distillation (2017); DOI: 10.1016/j.egypro.2017.12.317
15. Application of pinch analysis to improve the heat integration efficiency in a crude distillation units (2021); DOI: 10.1016/j.clet.2021.100168
16. Retrofit of heat exchanger networks by graphical Pinch Analysis – A case study of a crude oil refinery in Kuwait(2021); DOI: 10.1016/j.csite.2021.101030
17. Minimization and optimization of water consumption in an oil refinery using water pinch analysis: A case study in Iran (2024); DOI: 10.1016/j.wri.2024.100254