

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 1 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/BGQF1934>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындык Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

| | |
|------------------|---|
| Клецель М. Я., | <i>д.т.н., профессор</i> |
| Никифоров А. С., | <i>д.т.н., профессор</i> |
| Новожилов А. Н., | <i>д.т.н., профессор</i> |
| Алиферов А. И., | <i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i> |
| Кошекков К. Т., | <i>д.т.н., профессор</i> |
| Приходько Е. В., | <i>к.т.н., профессор</i> |
| Кислов А. П., | <i>к.т.н., доцент</i> |
| Нефтисов А. В., | <i>доктор PhD</i> |
| Шерьязов С. К. | <i>т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)</i> |
| Искакова З. С. | <i>технический редактор</i> |

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

<https://doi.org/10.48081/BGQF1962>

***Я. Сергеев¹, Г. Ж. Сейтенова², Р. М. Дюсова³**

^{1,3}Торайғыров университет,

Республика Казахстан, г. Павлодар;

²Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,

Республика Казахстан, г. Астана

¹ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2090-9143>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6202-3951>

³ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3083-5255>

*e-mail: sergeevs_yakobs@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ПИНЧ-АНАЛИЗА КАК МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ЗАВОДОВ

Статья посвящена исследованию применения методологии пинч-анализа для повышения энергоэффективности нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ). В условиях роста цен на энергоносители и ужесточения экологических требований пинч-анализ представляет собой мощный инструмент оптимизации энергопотребления, позволяющий снизить операционные затраты и уменьшить углеродный след предприятий. Методология основана на тепловой интеграции процессов, что особенно актуально для НПЗ, являющихся одними из крупнейших потребителей энергии. В статье проведен обзор современных научных публикаций, демонстрирующих эффективность пинч-анализа на различных технологических объектах. Рассмотрены ключевые преимущества метода, включая снижение энергопотребления на 15–45 %, сокращение затрат на топливо и уменьшение выбросов парниковых газов. Особое внимание уделено барьерам внедрения пинч-анализа на постсоветском пространстве, где многие предприятия были спроектированы без учета современных требований к энергоэффективности.

Приведены примеры успешного применения пинч-анализа на российских и зарубежных НПЗ, такие как модернизация теплообменных сетей, интеграция органических циклов Ренкина

(ORC) и оптимизация водопотребления. Отмечено, что наибольший экономический эффект достигается на установках первичной переработки нефти и каталитического крекинга, где тепловая интеграция позволяет рекуперировать до 67,5 МВт энергии.

Статья раскрывает потенциал пинч-анализа в контексте устойчивого развития, включая снижение эмиссий CO₂ и внедрение возобновляемых источников энергии. Для дальнейшего развития метода рекомендуется активное использование современных программных инструментов, таких как Aspen Energy Analyzer, и проведение прикладных исследований в области гибридных энергетических систем.

Ключевые слова: пинч-анализ, энергоэффективность, нефтеперерабатывающие заводы, тепловая интеграция, рекуперация тепла.

Введение

Рост цен на энергоносители, ужесточение экологических требований и необходимость повышения конкурентоспособности промышленных предприятий обуславливают актуальность поиска эффективных методов оптимизации энергопотребления.

Одним из наиболее результативных подходов является методология пинч-анализа, позволяющая минимизировать затраты на энергоснабжение за счет оптимизации систем теплообмена и интеграции процессов. Нефтеперерабатывающие заводы, являясь одними из крупнейших потребителей энергии, обладают высоким потенциалом для применения методов пинч-анализа. В настоящей статье рассматривается мировой опыт применения данной технологии в нефтепереработке, анализируются примеры успешных внедрений, а также оценивается перспективность использования пинч-методов на предприятиях постсоветского пространства.

Утверждение о проблеме

Несмотря на доказанную эффективность пинч-анализа в мировой практике, его применение в нефтеперерабатывающей отрасли на постсоветском пространстве остаётся ограниченным. Большинство предприятий были спроектированы в условиях низких цен на энергию и минимального внимания к вопросам энергоэффективности. Это привело к широкому распространению нерациональных схем теплоснабжения, недостаточной интеграции процессов и высоким удельным расходам топлива. В современных экономических условиях отсутствие эффективной теплоинтеграции становится фактором, препятствующим снижению

операционных расходов и достижению экологических целей. Применение пинч-анализа способно устранить эти барьеры за счёт реконфигурации тепловых сетей и оптимизации технологических потоков.

Частой практикой, встречающейся на ряде нефтеперерабатывающих заводах, является нерациональное использование энергии, недостаточная теплоинтеграция между отдельными процессами. Необходимо принимать во внимание, что практически все крупные предприятия нефтеперерабатывающей отрасли проектировались 50-70 лет назад в совершенно других экономических условиях.

В условиях рыночной экономики одной из основных статей расхода предприятия является энергия. В этой связи методология пинч-анализа позволяет оценить технологические схемы существующих предприятий на предмет эффективности и соответствия требуемым экономическим показателям.

В статье на основании приведенных источников приведена возможность использования методов пинч-анализа по улучшению технико-экономических показателей предприятия по следующим направлениям:

- снижение потребления энергоресурсов;
- снижение потребления топлива;
- сокращение эмиссий;
- улучшение методов и средств контроля.

На рисунке 1 приведена статистика по количеству проведенных исследований в развивающихся странах по теме пинч-анализа в разрезе по странам проведения в период 2008-2017 гг. Лидерами в проведении пинч-анализа среди выборки являются Китай, Малайзия и Индия, что связано с активным развитием промышленности в этих странах и энергосберегающих технологиях. Примечательно, что почти все из этих исследований проведены университетами в этих странах.

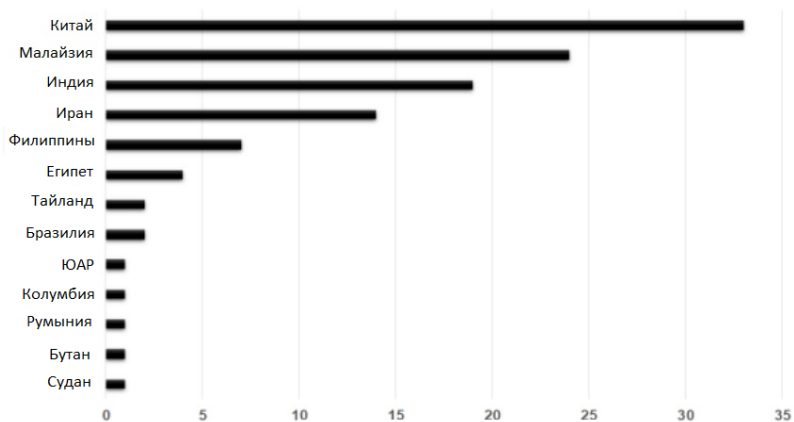


Рисунок 1 – Количество исследований пинч-анализа в развивающихся странах (2007-2018 гг.)

Материалы и методы

Методами изучения является литературный обзор. Пинч-анализ также известен как процесс интеграции, тепловая интеграция, энергетическая интеграция или пинч-технология. Исходные данные для процесса представляются в виде набора энергетических потоков или зависимостей тепловой нагрузки (кВт) от температуры ($^{\circ}\text{C}$). Эти данные объединяются для всех потоков на предприятии, чтобы дать композитные кривые, одну для всех горячих потоков (отдающих тепло) и одну для всех холодных потоков (требующих тепло). Точка наибольшего сближения горячей и холодной составной кривой называется точкой пинча (или просто пинч). Для горячей и для холодной составной кривой температура пинча будет индивидуальна. В области пинча на процесс проектирования оптимальной системы теплообмена накладываются наибольшие ограничения. Таким образом, найдя эту точку и начав проектирование с неё, можно достичь целевых энергетических значений с помощью системы теплообменников путём передачи теплоты между горячими и холодными потоками в двух независимых подсистемах, выше и ниже пинча. На практике во время проведения пинч-анализа существующего процесса довольно часто существует перекрестный теплообмен между горячим потоком с температурой выше пинча и холодным потоком ниже пинча. Устранение подобных связей и создание альтернативных, позволяет улучшить процесс и достичь энергетических целей [1].

Типичная пинч-диаграмма приведена на рисунке 2.

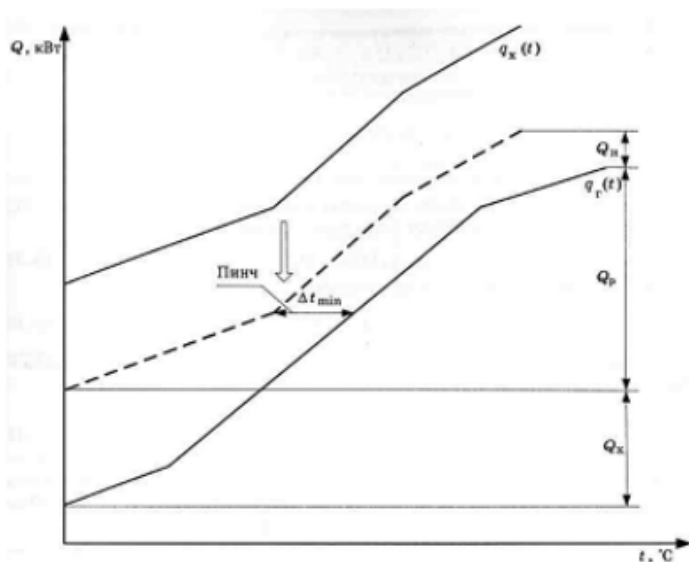


Рисунок 2 – Пинч-диаграмма

Результаты и обсуждение

Современные исследования в области энергетики и теплотехники активно используют методологию пинч-анализа для оптимизации процессов интеграции и повышения эффективности энергосистем. В данной работе представлен обзор ключевых публикаций, охватывающих различные аспекты применения данного подхода.

Концепция пинча с рекуперацией тепла была независимо открыта и разработана Хохманном и, в меньшей степени, Хуаном и Элсхоутом. В статье Яромира Клемеса и соавторов [2] описаны современные подходы к интеграции процессов на основе пинч-анализа. Однако основными пионерами пинча с рекуперацией тепла были Линхофф и Флауэр. Важно упомянуть, что некоторые из термодинамических принципов уже были представлены Линхоффом в его диссертации на степень магистра наук. Основная идея заключалась в том, чтобы нарисовать отдельные общие требования к нагреву и общему охлаждению процесса кумулятивным образом с использованием диаграммы «температура – энтальпия», в основном известной как составные кривые. Гундерсен отмечает, что подобные графики

ранее использовались проектировщиками низкотемпературных процессов, таких как разделение воздуха (компанией Linde AG в Германии), для проектирования многопоточных теплообменников. Авторами отмечается, что на этапах разработки методики пинч-анализа Линнхофф и его коллеги уделяли большое внимание вопросам модернизации сетей теплообмена. Одной из важнейших концепций, вытекающих из этой ранней работы, была необходимость избегать любого теплообмена через точку пинч. Другой очень ранней концепцией была идея эффективности площади, т. е. $\Delta Q/\Delta A$. Эти две концепции с тех пор применялись много раз для сравнения ориентировочной общей экономической эффективности различных вариантов модернизации. Известно, что всякий раз, когда тепло передается через точку пинч, возникает неэффективность, что препятствует достижению целевых показателей. Таким образом, для достижения целевых показателей теплоноситель должен использоваться только выше точки Пинч, а хладагент – ниже точки пинч. Большая часть усилий по методам анализа модернизации с того времени была направлена на реализацию концепции выявления и устранения теплообмена через точку пинча. Авторы отмечают, что данный метод продолжает развиваться, особенно в контексте устойчивого развития и энергоэффективности. Интеграция процессов на основе пинч-анализа существует уже более 40 лет и продолжает совершенствоваться. Исследование подчеркивает важность учета новых промышленных тенденций, таких как циркулярная экономика и снижение выбросов углерода, для повышения эффективности использования энергии.

В работе авторов Чэнтянь Цуя и Цзиньшэн Суня [3] рассматривалось применение метода пинч-анализа на установке первичной переработки нефти. Данная работа выделяется тем, что рассмотрена технологическая схема верхнего уровня. В этом исследовании представлен пример трех отдельных установок первичной переработки нефти на одном и том же нефтеперерабатывающем заводе, с различными характеристиками сырья и рабочими целями. Конкретные усилия заключались в том, чтобы максимизировать рекуперацию энергии более масштабной системы (всех трех комплексов первичной переработки нефти), также состоящей из подсистем (сети теплообменников). В поисках возможностей проектирования связей между различными подсистемами были проанализированы большие составные кривые (ГКК) для согласования подходящих тепловых каскадов через взаимосвязи между подсистемами теплообменников. В качестве вывода Чэнтянь Суй и Цзиншэн Сун отмечают, что большое количество энергии может быть рекуперировано за счет правильного согласования тепловых каскадов и связи между отдельными технологическими установками.

Методы пинч-анализа широко применяются на энергетических объектах нефтеперерабатывающих заводов, таких как тепловые насосы, комбинированные системы производства тепла и электроэнергии или органические циклы Ренкина (ORC), которые могут быть оптимально интегрированы в технологический процесс [4]. ORC преобразует низкотемпературное отходящее тепло (например, 100-200°C) в электричество. Тем не менее, интеграция органических циклов Ренкина требует продуманного дизайна для обеспечения надлежащей интеграции.

Использование методов пинч-анализа применительно к технологиям ORC заключалось в определении потоков, наиболее подходящих для полезной утилизации энергии. Так называемая большая составная кривая используется для интегрирования ORC, чтобы обеспечить правильное размещение при рассмотрении всего процесса. Правильно интегрированный ORC, использующий отходящее тепло в качестве источника тепла, должен работать ниже точки пинча, т.е. ORC забирает тепло ниже точки пинча и преобразует его часть в электричество, а оставшееся тепло рассеивается в окружающую среду. Эта методология подчеркивает повышение общей энергетической эффективности процесса в первую очередь за счет рекуперации тепла перед использованием (реального) отработанного тепла в ORC.

Удобство композитных кривых для анализа энергетических систем отмечалось множеством исследователей. Группой авторов Дяньлян Фу, Гуйсян Лу, Хуэйцзюань Су, Яньхуа Лай, Линь Лу, Чжэнь Дун, Минсинь Лю опубликована научная работа на тему «Расширенный комплексный графический инструмент со смещенными температурами потока для эффективного проектирования экономически эффективных сетей теплообменников» [5]. Авторами разработан графический инструмент для оптимизации сетей теплообменников с применением среды математического моделирования Matlab. Авторы объединили четыре типа данных потока, включая температуру, энергию, расход теплоемкости и коэффициент теплопередачи, специально реализованные пятью независимыми и взаимосвязанными подграфами.

Нефтепереработка является энергоемкой отраслью. Среди основных установок-потребителей энергии, помимо установки первичной переработки нефти, можно выделить установку каталитического крекинга. Процесс каталитического крекинга является экзотермическим, со значительным выделением теплоты. Полезное использование этого тепла является приоритетной задачей при теплоинтеграции установки каталитического крекинга и смежных установок. Авторами Сяо Лю, Чэнтянь Цуй, Цзе Хэ, Цзиньшэн Сунь в исследовании [6] рассматривается вопрос о холодильной

системе, связанной с отходящим теплом установки каталитического крекинга. Предлагается новый процесс охлаждения с использованием собственного низкопотенциального тепла для одновременного повышения энергоэффективности и производительности установки, а также проведен анализ систем утилизации энергии, основанной на органическом цикле Ренкина (ORC) в сравнении с абсорбционным охлаждением.

Авторы Бохонг Ван, Jiří Jaromír Klemeš, Лимей Гай, Петар Сабев Варбанов, Юнту Лян в работе «Сжатие тепла и электроэнергии для интеграции процессов в гибридных энергетических системах» [7] использовали пинч-анализ в гибридных системах (системах комбинированного производства тепла и электроэнергии). В этой статье была расширена концепция пинч-анализа и предложен теплоэнергетический пинч-анализ для определения количества тепла, которое должно быть рекуперировано из гибридной энергетической системы. Композитная кривая тепла и электроэнергии (НРСС) разработана для визуализации общей потребности в энергии и разделенной тепле и электроэнергии (электричестве) гибридной энергетической системы в течение рабочего периода времени. Этот вклад позволил создать новый метод определения минимальных целевых значений мощности (электроэнергии) под названием «Анализ тепла и мощности» (НРРА) для комбинированных систем производства тепла и электроэнергии.

Еще одним актуальным направлением использования пинч-анализа является снижение углеродного следа, также весьма актуальным направлением нефтепереработки. В работе [8] авторами предпринята попытка разработки систематической основы планирование эмиссий CO₂ с промышленной площадки с использованием интегрированного набора инструментов, связанных с пинч-анализом, с алгебраическими алгоритмами, созданными для дополнения графического представления. Применение этой систематической схемы к наглядному примеру промышленного объекта привело к общему снижению теплоснабжения на 56,7 %, электроэнергии на 74,3 % и CO на 99,8 %.

В работе [9] на основе методов пинч-анализа была разработана интегрированная система для производства сжиженного природного газа и чистого водорода с использованием отходящих газов из различных отраслей промышленности. Для этой цели охлаждение, необходимое для очистки водорода и сжижения природного газа, обеспечивается с помощью смешанной системы охлаждения хладагента. Разработан органический цикл Ренкина на основе избыточного тепла системы в качестве поглотителя тепла и возобновляемой солнечной энергии в качестве источника тепла. Итоговые результаты, полученные в результате параметрического исследования,

представляют собой увеличение производительности основных продуктов (СПГ и чистого водорода) на 25,88 %. Кроме того, когда соотношение СПГ и топливного газа увеличивается на 48,08 %, соотношение основного продукта и побочного продукта увеличивается с 54 до 62 моль %.

Авторы Раджарши Бандьопадхьяй, Оле Фрей Алкилде, Шридеви Упадхьяюла в работе [10] делятся опытом применения пинч-анализа и анализа эксергии при проектировании нового технологического предприятия с целью повышения его энергоэффективности на примере установки гидроочистки дизельного топлива. Методы пинч-анализа используются для оценки минимальной потребности в энергии, выбора инженерных сетей и проектирования оптимальной сети теплообменников, в частности, проводилось сравнение схем холодной и горячей сепараций.

В работе Аделя Булуаша [11] рассматривается разработка технологического процесса и экономическая оценка интеграции органического Ренкина открытого цикла (ORC) во фракционную перегонку алканов. Интеграция оптимизирована в рамках технологии пинчирования и практически обеспечивается за счет использования смесей технологических жидкостей дистилляции легких, средних и высших алканов в качестве рабочих жидкостей в открытых циклах. По сравнению с n-пентановым ORC, результаты показывают, что OROC могут выдавать 3 МВт мощности при снижении удельных инвестиционных и эксплуатационных затрат на 23,27 % соответственно.

В работе «Новый подход к модернизации процесса абсорбции-стабилизации для повышения энергоэффективности на нефтеперерабатывающих заводах» [12]. В этой работе представлен новый процесс абсорбции-стабилизации с двухступенчатой конденсационной секцией для дальнейшего повышения эффективности использования энергии. В новом процессе конденсатор, продуктовая емкость и боковой ребойлер интегрированы в исходный процесс, а затем выполняется схема интеграции тепла. По сравнению с существующим процессом предлагаемый процесс может сократить холодную и горячую полезность на 17,98 % и 25,65 % соответственно, а также снизить общие годовые эксплуатационные расходы сети теплообменников на 17,48%. Кроме того, модернизация процесса снижает годовые эксплуатационные расходы на охлаждающую воду и пар примерно на 346 617 долларов за счет капитальных затрат около 487 006 долларов, а соответствующий период окупаемости составляет примерно 17 месяцев. В качестве среды применения методов пинч-анализа использовалась среда моделирования Aspen Energy Analyzer v.7.2

Аналогичные методы применялись группой авторов (Маджид Мохсенпур, Мохаммад-Махди Пазуки, Мохсен Салими, Маджид Амидпур) применительно к сети теплообменников установки фталевого ангидрида в работе [13]. Чтобы улучшить рекуперацию энергии при минимизации количества агрегатов, авторами была разработана оптимизированная сеть теплообменников с использованием технологии сжатия. Вместо того, чтобы поглощать избыточное тепло через охлаждающую воду, оно было перенаправлено на выработку пара в парогенераторе-рекуператоре. Такой стратегический подход позволяет заводу избежать ежегодных затрат на охлаждение, оцениваемых примерно в 54 621 евро, при работе в течение 7 000 часов в год. По расчетам авторов, компания должна получить значительную годовую прибыль в размере около 477 295 евро. Для достижения цели также применялся метод пинч-анализа с использованием среды Aspen Energy Analyzer.

Помимо использования методов пинч-анализа применительно к сетям теплообменников, широко распространена практика энергетической интеграции энергоемкого оборудования для оптимизации использования энергии. Так, в работе [14] исследование использования метода движущей силы для определения наилучшей последовательности дистилляции для повышения энергоэффективности в процессе ректификации смеси алканов, состоящей из пяти компонентов: н-гексан, н-гептан, н-октан, н-нонан и н-декан. С помощью программного обеспечения ASPEN HYSYS V9 авторами было проведено тщательное моделирование 14 возможных последовательностей дистилляционных колонн, включая последовательность движущих сил. Затем данные были извлечены для пинч-анализа и определена наилучшая последовательность на основе общей нагрузки, тепловой нагрузки и нагрузки на охлаждение. Затем была предложена сетчатая схема для сети теплообменников для наилучшей конфигурации. Был определен лучший из вариантов, в котором удалось снизить на 33,87 % тепловую нагрузку и на 35,84 % нагрузку на систему охлаждения.

Наибольший экономический эффект применение методов пинч-анализа и рекуперации энергии приносит на крупных потребителях энергии. В условиях нефтеперерабатывающих заводов, как правило, наиболее крупным потребителем энергии является установка первичной переработки нефти, на которой происходит первичное разделение нефти на фракции. Группой авторов (Сабри Мрайед, Мохамед бин Шамс, Мухаммед аль-Хайят, Нассер аль-Нуайми) в работе «Применение пинч-анализа для повышения эффективности интеграции тепла в установке перегонки сырой нефти» [15] была проведена оценка тепловой эффективности сети теплообменников

существующей установки первичной переработки нефти. Авторами отмечается, что метод пинч-анализа может помочь свести к минимуму потери энергии за счет модернизации сети теплообменников и он доказал свою эффективность во многих аспектах применения. В ходе сравнения различных вариантов конфигурации, определено, что может быть восстановлено около 67,5 МВт максимальной мощности охлаждения и нагрева по сравнению с существующей нагрузкой на энергосистему в 148,6 МВт, что составляет снижение приблизительно на 45 %. Аналогичный опыт представлен при анализе методом пинч-анализа сетей теплообменников подогрева сырой нефти на нефтеперерабатывающем заводе в Кувейте [16].

Аналогичный принцип использования пинч-анализа может быть применен при сокращении энергоресурсов. Группа авторов (Хасан Хашеми, Фаллах ха-Шеми, Стефани Янг, Фируз Рости) в работе [17] «Минимизация и оптимизация расхода воды на нефтеперерабатывающем заводе с помощью водного пинч-анализа: тематическое исследование в Иране». Результаты данного исследования показывают, что анализ воды может быть использован для минимизации потребления пресной воды за счет сокращения потребления пресной воды до 45 % при подходе «Single Pollutant (химическое потребление кислорода или общие взвешенные примеси) и на 56 % при подходе Double Pollutant (химическое потребление кислорода и общие взвешенные примеси), а также привело к сокращению образываемых сточных вод на 31% и 52 % на нефтеперерабатывающем заводе в Керманшахе. Этот метод может быть применен не только на нефтеперерабатывающих заводах, но и в других водоемких отраслях промышленности для оптимизации использования воды.

Аналогичный опыт был приведен на ряде российских нефтяных компаний. В ОАО «ТАИФ-НК проект по оптимизации энергозатрат на установке гидрокрекинга позволил снизить потребление пара на 15 %.

По данным ПАО «ЛУКОЙЛ», внедрение пинч-анализа на нефтеперерабатывающем заводе в Перми привело к экономии топлива на 10 %. В ООО «КИНЕФ» проект по модернизации теплообменной сети на установке каталитического риформинга позволил снизить энергозатраты на 20 %.

Эффекты от рассмотренных примеров применения пинч – анализа приведены в таблице 1:

Таблица 1 – Примеры внедрения пинч-анализа на нефтеперерабатывающих заводах

| № | Предприятие | Объект | Экономия энергии | Снижение затрат |
|---|------------------------|---------------------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 1 | ОАО «ТАИФ-НК» (Россия) | Установка гидрокрекинга | 15 % (пар) | - |
| 2 | ПАО «Лукойл» (Россия) | Технологические печи | 10 % (топливо) | - |
| 3 | ООО «КИНЕФ» (Россия) | Установка каталитического риформинга | 20% (энергозатраты) | - |
| 4 | Кувейтский НПЗ [16] | Установка первичной переработки нефти | 45 % (тепло/охлаждение) | - |
| 5 | Иранский НПЗ [17] | Оборотное водоснабжение | 45–56 % (вода) | Снижение стоков на 31–52 % |
| 6 | Иранский НПЗ | Установка фталевого ангидрида | - | 477 295 Евро/год |

Сравнение использованных в статье методов оптимизации энергопотребления приведено в таблице 2:

Таблица 2 – сравнение методов оптимизации энергопотребления

| Метод | Преимущества | Недостатки | Применимость на НПЗ |
|---------------------------------------|--|---|---------------------|
| Пинч-анализ | Высокая точность, снижение затрат на 15-45%, возможность масштабирования | Требует детальных данных для построения модели и проведения анализа | Широкая |
| Использование органических циклов ORC | Утилизация низкопотенциального тепла | Высокие капитальные затраты | Ограниченная |
| Абсорбционное охлаждение | Энергоэффективность | Сложность интеграции | Узкая |

Информация о финансировании

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

Выводы

Проведенный анализ демонстрирует, что пинч-анализ является высокоэффективным инструментом повышения энергоэффективности нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ). Его применение позволяет достичь значительного сокращения энергопотребления (на 15–45 %) за счет оптимизации тепловых потоков, рекуперации тепла и минимизации потерь энергии. Наибольший эффект наблюдается на устаревших производствах, где изначально отсутствовала глубокая интеграция технологических процессов.

Ключевые преимущества пинч-анализа включают:

- Снижение эксплуатационных затрат за счет уменьшения потребления топлива, пара и охлаждающих агентов.
- Экологическую выгоду – сокращение выбросов CO₂ и других вредных веществ благодаря более рациональному использованию энергии.
- Гибкость применения – метод может быть адаптирован для различных процессов, включая первичную переработку нефти, каталитический крекинг и гидроочистку.
- Интеграцию возобновляемых источников энергии, таких как органические циклы Ренкина (ORC), использующие низкопотенциальное тепло.

Однако внедрение пинч-анализа сопряжено с рядом сложностей, включая необходимость точных исходных данных, высокие капитальные затраты на модернизацию и сопротивление изменениям на предприятиях с устоявшимися технологическими схемами. Для преодоления этих барьеров рекомендуется:

- Использовать современное программное обеспечение (Aspen Energy Analyzer, MATLAB) для моделирования и оптимизации процессов.
- Разрабатывать поэтапные планы модернизации с учетом экономической целесообразности.
- Проводить обучение персонала и внедрять культуру энергоэффективности на предприятиях.

В перспективе дальнейшее развитие пинч-методов должно быть направлено на их интеграцию с цифровыми технологиями (AI, IoT) и расширение применения в гибридных энергосистемах. Это позволит не только повысить энергоэффективность НПЗ, но и обеспечить их устойчивое развитие в условиях ужесточающихся экологических норм и роста конкуренции на рынке.

Таким образом, пинч-анализ остается одним из наиболее перспективных подходов к оптимизации энергопотребления в нефтепереработке, сочетающим экономическую выгоду, экологичность и технологическую эффективность.

В дополнение к экономическим выгодам, пинч-анализ способствует снижению выбросов парниковых газов и повышению технологической надежности. Рекомендуется активное внедрение методологии на существующих

и проектируемых нефтеперерабатывающих предприятиях, а также развитие прикладных исследований в области интеграции органических циклов Ренкина и водоподготовки с применением пинч-методов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Linnhoff, B., Hindmarsh, E.** The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks // *Chemical Engineering Science*. – 1983. – № 5. – P. 745–763.

2 **Klemeš, J.** New directions in the implementation of Pinch Methodology (PM) // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – № 98. – P. 439–468.

3 **Chengtian, C., Jinsheng, S.** Coupling design of interunit heat integration in an industrial crude distillation plant using pinch analysis // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. – № 117. – P. 145–154.

4 **Olsen, D., Abdelouadoud, Y., Liem, P.** The Role of Pinch Analysis for Industrial ORC Integration // *Energy Procedia*. – 2017. – № 129. – P. 74–81.

5 **Dianliang, F., Guixiang, L., Huijuan, S., Yanhua, L., Lin L., Zhen D., Mingxin, L.** An advanced comprehensive graphical tool with shifted stream temperatures to efficiently design cost-effective heat exchanger network // *Energy*. – 2018. – №145. – P. 356–366.

6 **Siyao, L., Chengtian, C., Jie, H., Jinsheng, S.** Feasibility assessment of a novel refrigeration FCC gas plant driven by self waste heat // *Energy*. – 2018. – № 145. – P. 356–366.

7 **Wang, B., Klemeš, J., Gai, L., Varbanov, S.P., Liang, Y.** Heat and Power Pinch for Process Integration targeting in hybrid energy systems // *Journal of Environmental Management*. – 2021. – №287. – P. 112–123.

8 **Ezah, A., Sharifah A., Rafidah, W.** An integrated Pinch Analysis framework for low CO₂ emissions industrial site planning // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – № 146. – P. 125–138.

9 **Ahmadnejad, A., Ebrahimi, A., Ghorban, B.** Pinch and exergy assessment of an innovative hydrogen and methane purification process configuration based on solar renewable energy // *Fuel*. – 2024. – № 359. – P.130–134.

10 **Rajarshi, B., Ole F., Sreedevi, U.** Applying pinch and exergy analysis for energy efficient design of diesel hydrotreating unit // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – №232. – P. 337–349.

11 **Boualouache, A.** Integration of organic Rankine open cycles to alkanes fractional distillation: Process design and techno-economic assessment // *Chemical Engineering and Processing. Process Intensification*. – 2023. – № 189. – 109 p.

12 **Liu, X. G., He, J. J., Chen, B. J., Zhang, Q. L.** A new retrofit approach to the absorption-stabilization process for improving energy efficiency in refineries // *Energy*. – 2017. – № 118. – P. 1131–1145.

13 **Mohsenpour, M., Pazuki, M.M., Salimi, M., Amidpour, M.** Optimized heat exchanger network design for a phthalic anhydride plant using pinch technology: A Maximum Energy Recovery approach with economic analysis // *Results in Engineering*. – 2024. – № 24. – 103438.

14 **Shahrudin, M. Z., Rahimi, A. N., Zubir, M. A., Fakhrul, M.** Energy Integrated Distillation Column Sequence by Driving Force Method and Pinch Analysis for Five Components Distillation // *Energy Procedia*. – 2017. – № 142. – P. 4085–4091.

15 **Mrayed, S., Bin Shams, M., Al-Khayyat, M., Alnoaimi, N.** Application of pinch analysis to improve the heat integration efficiency in a crude distillation units // *Cleaner Engineering and Technology*. – 2021. – 100168.

16 **Alhajri I. H., Gadalla M. A., Abdelaziz, O. Y., Ashour F. H.** Retrofit of heat exchanger networks by graphical Pinch Analysis – A case study of a crude oil refinery in Kuwait // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2021. – № 26. – 101030.

17 **Hashemi, H., Hashemi, F., Young, S., Rosti, F.** Minimization and optimization of water consumption in an oil refinery using water pinch analysis: A case study in Iran // *Water Resources and Industry*. – 2024. – № 31. – 100254.

Поступило в редакцию 06.05.25.

Поступило с исправлениями 28.01.26.

Принято в печать 27.02.26.

**Я. Сергеев*¹, *Г. Ж. Сейтенова*², *Р. М. Дюсова*³

^{1,3}Торайғыров университеті,

Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;

²Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті,

Қазақстан Республикасы, Астана қ.

06.05.25 ж. баспаға түсті.

28.01.26 ж. түзетулерімен түсті.

27.02.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

МҰНАЙ ӨҢДЕУ ЗАТТАРЫНЫҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ТІІМДІЛІГІН АРТТЫРУ ӘДІСІ РЕТІНДЕ ПИНЧ-ТАЛДАУДЫ ҚОЛДАНУ

*Мақала мұнай өңдеу зауыттарының энергия тиімділігін
арттыру үшін шымыу талдау әдістемесін қолдануды зерттеуге*

арналған. Энергия бағасының өсуі және қатаң экологиялық талаптар жағдайында шымыу талдау операциялық шығындарды азайтуға және кәсіпорындардың көміртегі ізін азайтуға мүмкіндік беретін энергия тұтынуды оңтайландырудың қуатты құралы болып табылады. Әдістеме процестердің жылулық интеграциясына негізделген, бұл әсіресе ең ірі энергия тұтынушыларының қатарына жататын мұнай өңдеу зауыттары үшін маңызды. Мақалада әртүрлі технологиялық қондырғыларда шымыу талдауының тиімділігін көрсететін заманауи ғылыми басылымдарға шолу берілген. Әдістің негізгі артықшылықтары қарастырылады, оның ішінде энергия тұтынуды 15-45%-ға төмендету, отын шығынын азайту және парниктік газдар шығарындыларын азайту. Посткеңестік кеңістікте шымыу талдауды жүзеге асырудағы кедергілерге ерекше назар аударылады, мұнда көптеген кәсіпорындар энергия тиімділігінің заманауи талаптарын есепке алмастан жобаланған. Жылу алмасу желілерін жаңғырту, органикалық Ранкин циклдерін (ORC) біріктіру және суды тұтынуды оңтайландыру сияқты ресейлік және шетелдік мұнай өңдеу зауыттарында шымыу талдауын сәтті қолдану мысалдары келтірілген. Ең үлкен экономикалық тиімділікке термиялық интеграция 67,5 МВт-қа дейін энергияны алуға мүмкіндік беретін мұнайды бастапқы өңдеу және каталитикалық крекинг қондырғыларында қол жеткізілетіні атап өтілді.

Мақалада CO_2 шығарындыларын азайту және жаңартылатын энергия көздерін енгізуді қоса алғанда, тұрақты даму контекстінде шымыу талдаудың әлеуеті ашылады. Әдістемені одан әрі дамыту үшін Aspen Energy Analyzer сияқты заманауи бағдарламалық құралдарды белсенді пайдалану және гибридті энергетикалық жүйелер саласында қолданбалы зерттеулер жүргізу ұсынылады.

Кілтті сөздер: шымыу талдауы, энергия тиімділігі, мұнай өңдеу зауыттары, технологиялық термиялық интеграция.

*Ya. Sergeevs¹, G. Zh. Seitenova², R. M. Duysova³

^{1,3}Toraighyrov University,

Republic of Kazakhstan, Pavlodar;

²L. N. Gumilyov Eurasian National University,

Republic of Kazakhstan, Astana.

Received 06.05.25.

Received in revised form 28.01.26.

Accepted for publication 27.02.26.

APPLICATION OF PINCH ANALYSIS AS A METHOD FOR INCREASING ENERGY EFFICIENCY OF OIL REFINERIES

The article is devoted to the study of the application of the pinch analysis methodology to improve the energy efficiency of oil refineries. In the context of rising energy prices and stricter environmental requirements, pinch analysis is a powerful tool for optimizing energy consumption, allowing to reduce operating costs and reduce the carbon footprint of enterprises. The methodology is based on thermal integration of processes, which is especially important for oil refineries, which are among the largest energy consumers. The article provides a review of modern scientific publications demonstrating the effectiveness of pinch analysis at various process facilities. The key advantages of the method are considered, including a decrease in energy consumption by 15–45 %, a reduction in fuel costs and a decrease in greenhouse gas emissions. Particular attention is paid to the barriers to the implementation of pinch analysis in the post-Soviet space, where many enterprises were designed without taking into account modern energy efficiency requirements. Examples of successful application of pinch analysis at Russian and foreign oil refineries are given, such as the modernization of heat exchange networks, the integration of organic Rankine cycles (ORC) and the optimization of water consumption. It is noted that the greatest economic effect is achieved at primary oil refining and catalytic cracking units, where thermal integration allows for the recovery of up to 67.5 MW of energy.

The article reveals the potential of pinch analysis in the context of sustainable development, including the reduction of CO₂ emissions and the introduction of renewable energy sources. For further development of the method, it is recommended to actively use modern software tools, such as Aspen Energy Analyzer, and conduct applied research in the field of hybrid energy systems.

Keywords: pinch analysis, energy efficiency, oil refineries, thermal integration, heat recovery.

Теруге 13.03.2026 ж. жіберілді. Басуға 31.03.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

28.54 Мб RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: З. Ж. Шокубаева

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4523

Сдано в набор 13.03.2026 г. Подписано в печать 31.03.2023 г.

Электронное издание

28.54 Мб RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: З. Ж. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4523

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz