

В процессе поиска решений по оптимизации существующих рекуперативных теплообменных систем (РТС) 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.

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 проектированию 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 CO₂.

Основная научно-техническая идея.

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). Реализована 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 Рис. 1.



Рисунок. 1. Блок-схема алгоритма синтеза оптимальной рекуперативной теплообменной системы

Описание результатов и их значение для практики.

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 АО «Ангарский завод полимеров» в целях снижения энергозатрат, а также на ЭЛОУ-АВТ-6 ПАО «Саратовский НПЗ» и на установке гидроочистки Л-24/8с ПАО «Сызранский НПЗ».

Для установки производства этилбензола АО «Ангарский завод полимеров» применение 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.

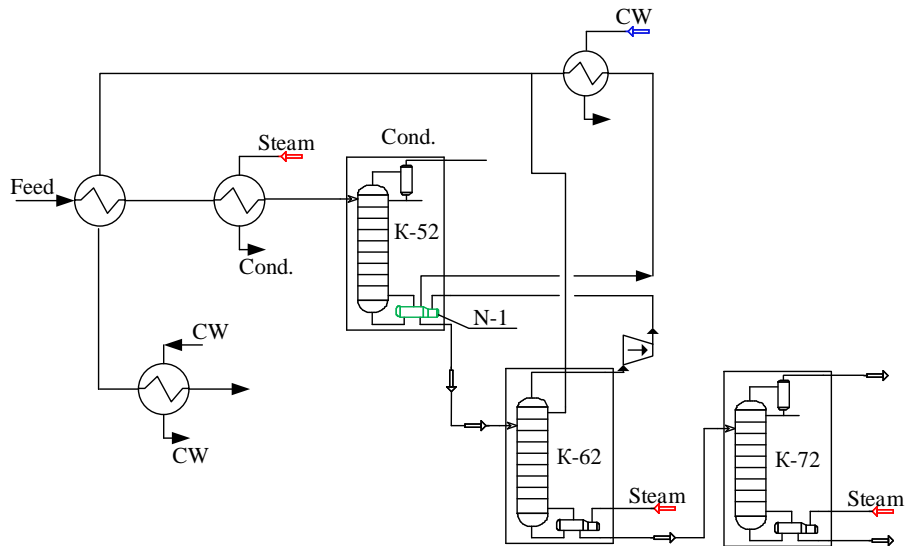


Рисунок 2. Принципиальная схема участка реконструкции завода по производству этилбензола

Компактное расположение оборудования на установке производства этилбензола позволяет объединить тепловой насос между двумя колоннами. Это позволяет 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 $1060 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К})$. Площадь поверхности теплообмена $132,5 \text{ м}^2$.

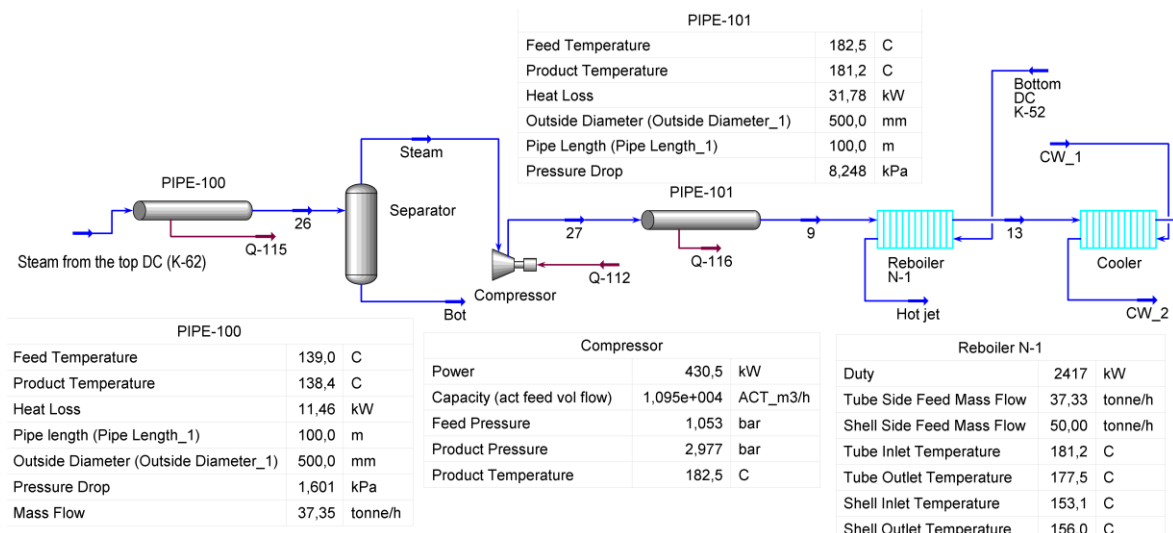


Рисунок 3. Модель участка реконструкции системы теплообмена установки

производства этилбензола

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

Таблица 1. Техничко-экономические показатели проекта модернизации

Параметр	Значение
Сокращение потребление тепловой энергии, Гкал/час	3,8
Сокращение выбросов ПГ, т.СО ₂ экв/час	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

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 ПАО «Саратовский НПЗ» позволило синтезировать оптимальную, с точки зрения достигнутого NPV, схему реконструкции.

Исследуемый технологический процесс имеет 19 рекуперативных теплообменников с площадью поверхности теплообмена 1000 м² 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).

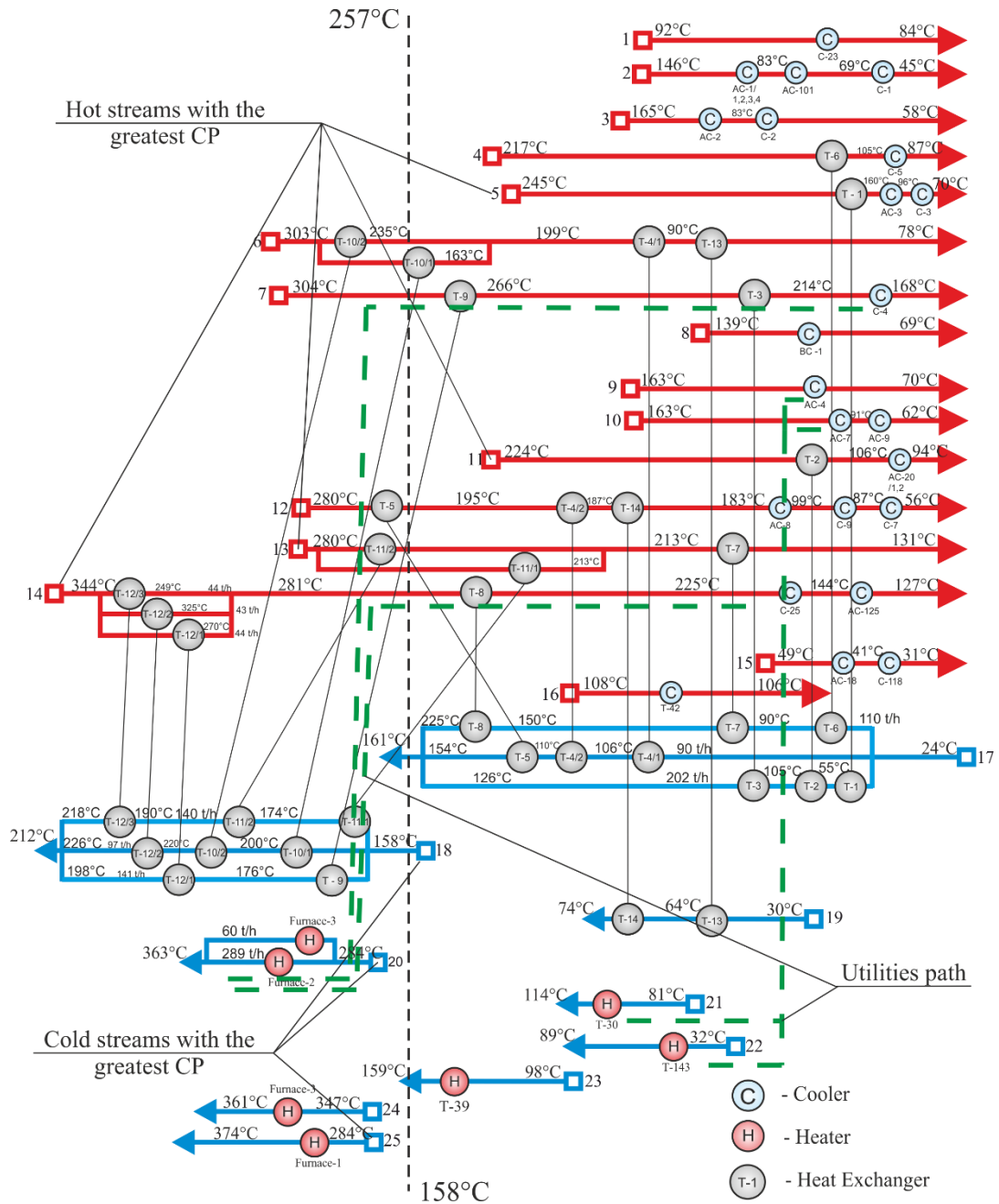


Рисунок 4. Схема с обозначением приоритетов модернизации PTC

С помощью «Pinch-SELOOP» была синтезирована новая PTC, в которой используются 18 существующих теплообменников, что существенно снизило затраты при реконструкции установки (Рис. 5).

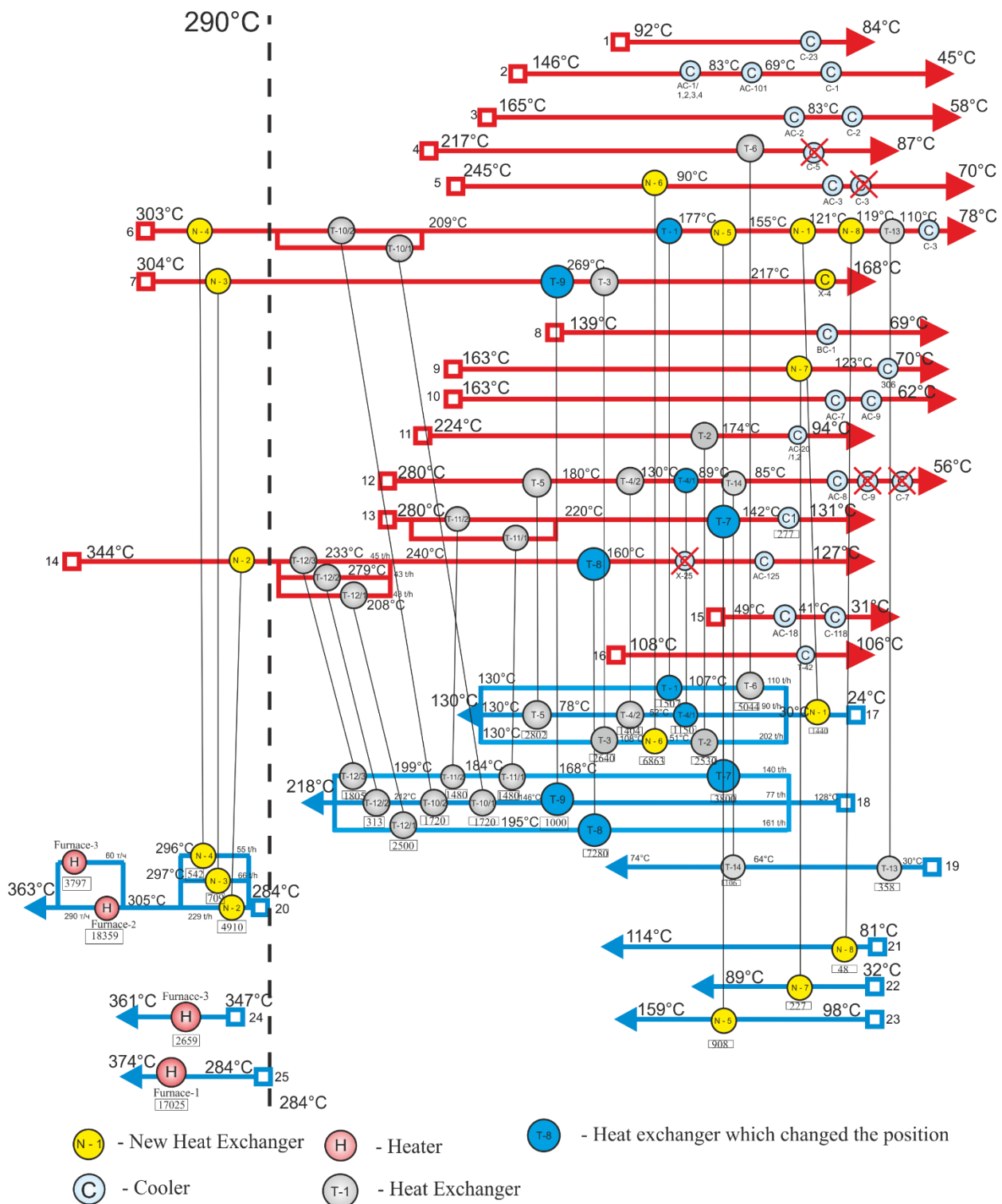


Рисунок 5. Сеточная диаграмма проекта модернизации. Новые теплообменники выделены желтым цветом; теплообменники, изменившие положение, выделены синим цветом.

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 ПАО «Сызранский НПЗ», 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.

Достигнутый экономический и (или) социальный эффект от внедрения.

Внедрение ПО «Pinch-SELOOP» в производственный процесс ООО «РусЭнергоПроект» при работе над созданием проектов реконструкции систем теплообмена на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях позволило апробировать ПО как на первичных, так и на вторичных процессах переработки нефти, а также на процессах нефтехимии при реконструкции установки производства этилбензола.

ООО «РусЭнергоПроект» разработало с использованием ПО «Pinch-SELOOP» на площадке АО «Ангарский завод полимеров» проект реконструкции существующей системы теплообмена установки производства этилбензола. Суммарная экономия пара составила 3,8 Гкал/ч, чистый дисконтированный доход (NPV), при совместной 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 ПАО «Саратовский НПЗ» 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 ПАО «Сызранский НПЗ», 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_{2экв} (210 тысяч тонн CO_{2экв} 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 EII® - 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.