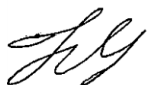


На правах рукописи

Юшкова Екатерина Александровна



**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА
НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ ПРЕДПРИЯТИИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО
ПИНЧ-АНАЛИЗА**

*Специальность 05.14.04 – Промышленная
теплоэнергетика*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

кандидат технических наук, профессор

Лебедев Владимир Александрович

Официальные оппоненты:

Сапожников Сергей Захарович
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», высшая школа атомной и тепловой энергетики, профессор;

Никитин Андрей Алексеевич
кандидат технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», факультет низкотемпературной энергетики, доцент.

Ведущая организация – Открытое Акционерное Общество «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 28 декабря 2020 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ГУ 2020.4 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2, ауд. № 1171-а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 28 октября 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОПТЕВА
Александра Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Топливо-энергетический комплекс в России потребляет значительную часть производимой энергии (45%). Повышение энергоэффективности топливно-энергетического комплекса является важной задачей государства. Существует ряд законодательных актов в области энергоэффективности и энергосбережения: Федеральный закон № 261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»; Государственная программа Российской Федерации «Развитие энергетики», Энергетическая стратегия России на период до 2035 г.; Указ Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации». Согласно этому указу, одно из приоритетных направлений развития науки является «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика». К критическим технологиям, определяющим проблемы топливно-энергетического комплекса России, относятся «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии».

На данный момент экономически наиболее значимой составной частью топливно-энергетического комплекса является нефтегазовый комплекс. В работе профессора Рейшахрит Е.И. подтверждается актуальность энергоэффективности в нефтеперерабатывающей отрасли: «Отрасль нефтепереработки характеризуется энергоемкими процессами производства. Нефтеперерабатывающие заводы России тратят намного больше топливно-энергетических ресурсов на производство 1 тыс. т нефтепродуктов, чем другие европейские страны. В себестоимости нефтепереработки доля затрат на топливо и энергию составляет около 54,7%».

Политика государства ставит задачу развития и модернизации отрасли нефтепереработки на основе передовых технологий, преимущественно отечественного производства. Также предполагается увеличение глубины выработки, следовательно, еще

повысится энергоемкость нефтеперерабатывающей отрасли. Данные задачи отражены в Энергетической стратегии России на период до 2035 г.

В 2010 г была принята «Генеральная схема развития нефтяной отрасли Российской Федерации на период до 2020 г.», в которой изложены цели и задачи государства для модернизации нефтеперерабатывающих заводов в направлении значительного увеличения глубины переработки. Данный документ предлагает план развития нефтеперерабатывающей отрасли, учитывая следующее:

- определение основных направлений повышения конкурентоспособности и инновационного развития нефтяной отрасли, включая направления повышения энергоэффективности;
- необходимость технологической модернизации отечественных НПЗ.

Все вышеприведенные документы утверждают о необходимости модернизации нефтеперерабатывающей промышленности с целью повышения энергоэффективности.

На данный момент, для исследования энергетических установок на энергоэффективность, чаще всего используют энтальпийный метод. Энтальпийный способ анализа обходит стороной следствие второго закона термодинамики, следовательно, не определяет энергию с качественной стороны. Более полную и объективную оценку различных видов энергии позволяет дать эксергетический подход, учитывающий качество энергии и ее способность к преобразованию в условиях функционирования исследуемого объекта.

При решении задач повышения энергоэффективности технических систем, в первую очередь, рассматриваются вопросы термодинамической оптимизации процессов, протекающих в элементах теплоэнергетического оборудования и в самих теплоэнергетических системах. Одним из наиболее эффективных методов параметрической оптимизации теплоэнергетических процессов является Пинч-анализ или метод интеграции тепловых процессов.

В связи с вышеизложенным возникает необходимость разработки такого метода термодинамического анализа и

совершенствования систем (в частности нефтеперерабатывающей промышленности), который бы сочетал достоинства эксергетического метода и метода структурной и параметрической оптимизации тепловых процессов на основе Пинч-анализа.

Степень разработанности темы исследования. В области эксергетического анализа основой для исследований послужили работы следующих авторов: Гохштейна Д.П., Бродянского В.М., Шаргута Я., Петелы Р., Сажина Б.С., Булекова А.П., Андриющенко А.И., Рубинштейна Я.М., Щепетильникова М.И. и др. В данных работах изложены теоретические основы эксергетического анализа.

Богданов А.Б. в статье доказывает, что применение понятий эксергии и анергия позволяет производить классификацию качества тепловой и электрической энергии.

Многие современные ученые рассматривают термодинамические процессы, используя эксергетический анализ: Цацаронис (Tsatsaronis G.) и Мунг-Хо (Moung-Ho P.) и другие.

Линнхофф Б., Клемеш Й., Товажнянский Л.Л. и Смит Р. первыми детально описали технологию проведения пинч-анализа.

Рашиди Жуан и Агапов Д. С. исследовали системы с помощью эксергетического и пинч-анализа. Но никто еще не пытался объединить эти два метода в один.

Многие ученые проводили традиционный пинч-анализ установки первой перегонки нефти, и добивались успехов в своих исследованиях: Мешалкин В.П., Товажнянский Л.Л., Ульянов Л.М., Мельниковская Л.А., Ходченко С.М. Хидиятуллин А.С., Гареева И.Ю., Руднев Н.А., Абызгильдин А.Ю. Но в их работах не учтены потери эксергии.

Цель исследования. Повышение энергоэффективности тепломассообменных процессов на нефтеперерабатывающем предприятии с использованием эксергетического пинч-анализа.

Идея исследования. Объединение методов эксергетического анализа и пинч-анализа энергоэффективности тепломассообменного оборудования нефтеперерабатывающего завода в один метод, позволяющий проводить структурную и параметрическую оптимизацию систем теплообмена с учетом качественных характеристик тепловой энергии.

Задачи исследования:

1. Провести анализ существующих методов оценки и повышения энергоэффективности систем теплообмена нефтеперерабатывающего предприятия и разработать метод эксергетического пинч-анализа.

2. Разработать практический метод измерения эксергии тепловых потоков.

3. Разработать математическую модель для метода эксергетического пинч-анализа, позволяющую формализовать процесс представления исходных данных, построение составных кривых и их оптимизацию на температурно-эксергетической плоскости.

4. Разработать алгоритм и провести структурную и параметрическую оптимизацию систем теплообмена нефтеперерабатывающего предприятия методом эксергетического пинч-анализа.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Предложен новый подход к оценке энергоэффективности тепломеханического оборудования, объединяющий методы эксергетического и пинч-анализа и позволяющий проводить структурную и параметрическую оптимизацию систем теплообмена в технологических процессах.

2. Разработана и апробирована математическая модель для проведения параметрической оптимизации системы теплообмена установки первичной перегонки нефти методом эксергетического-пинч анализа.

3. Предложен метод структурной и параметрической оптимизации системы теплообмена нефтеперерабатывающего предприятия в области генерации тепла и его использовании в технологиях первичной переработки нефти методом эксергетического-пинч анализа.

Теоретическая значимость:

1. Выявлены возможности использования эксергетического подхода в методологии пинч-анализа для оптимизации систем теплообмена в технологических процессах.

2. Разработан метод эксергетического пинч-анализа для структурной и параметрической оптимизации систем теплообмена нефтеперерабатывающего завода.

3. Предложены аналитические зависимости для построения математической модели параметрической оптимизации систем теплообмена.

4. Разработан алгоритм структурной оптимизации эксергетическим пинч-анализом.

5. Разработан алгоритм и метод непрерывного измерения эксергии потоков жидких и газообразных рабочих сред.

Практическая значимость:

1. Проведен сравнительный анализ структурной и параметрической оптимизации системы теплообмена установки первичной перегонки нефти двумя методами: традиционным пинч-анализом и эксергетическим пинч-анализом. Доказано преимущество разработанного метода эксергетического пинч-анализа перед традиционным пинч-анализом.

2. Разработано, запатентовано и апробировано устройство для непрерывного измерения эксергии.

3. Проведенный эксергетический пинч-анализ системы теплообмена установки первичной переработки нефти ЭЛОУ-АТ-6 и ее дальнейшая оптимизация выявили возможности уменьшения количества тепломассообменного оборудования по сравнению с традиционным методом пинч-анализа.

4. Эксергетический пинч-анализ печей Т-1А и Т-1В выявил неоптимальность организации тепловых потоков, заключающуюся в избыточном потенциале горячих потоков в верхней части печи и необходимости уменьшения потерь эксергии в радиантной секции печи.

5. В результате эксергетического пинч-анализа котельного агрегата выявлены параметрические и конструкционные недостатки, влияющие на его энергоэффективность и заключающиеся в потерях эксергии топлива порядка 34 %, предложены пути совершенствования конструкции котлоагрегата.

6. Разработана и внедрена в проектно-конструкторскую деятельность предприятия первичной переработки нефти методика применения эксергетического пинч-анализа для оптимизации систем

теплообмена при генерации и использования тепла в технологиях нефтеперерабатывающего завода.

Методы и методология исследования.

При решении задач диссертационного исследования использовались:

Методы теоретических исследований - теория технической термодинамики и тепломассообмена, теория эксергетического анализа, метод интеграции тепловых потоков, методы системного анализа, математического моделирования и оптимизации;

Методы экспериментальных исследований - теория планирования экспериментов, методы анализа и обработки экспериментальных данных, компьютерные программы моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Использование разработанного эксергетического пинч-метода, учитывающего потери эксергии, по сравнению с традиционным пинч-методом, позволяет повысить энергоэффективность тепломассообменных процессов на нефтеперерабатывающем предприятии.

2. Измерение эксергии рабочих тел в энергетических системах достигается при использовании метода, учитывающего взаимное влияние параметров рабочего тела и температуры окружающей среды, реализованного в запатентованном устройстве.

3. Разработанная математическая модель, формализующая процесс представления исходных данных, построение составных кривых и их оптимизацию на температурно-эксергетической плоскости, позволяет провести параметрическую оптимизацию систем теплообмена нефтеперерабатывающего предприятия, и на ее основе проводится структурная оптимизация систем теплообмена эксергетическим пинч-анализом.

Объект исследования – системы теплообмена в генерации и использовании тепла в технологиях переработки нефти на нефтеперерабатывающем предприятии.

Предмет исследования – тепломассообменные процессы в генерации тепла и его использовании в установках первичной переработки нефти.

Степень достоверности. Достоверность полученных результатов диссертационной работы достигнута за счет корректного использования теории системного анализа, методов термодинамического, эксергетического и пинч-анализа, методов теории систем и теории измерений, сходимостью результатов экспериментов и теоретических исследований при практическом измерении эксергии рабочих тел, сравнением результатов параметрической и структурной оптимизации теплообменного оборудования нефтеперерабатывающего предприятия, полученных традиционным пинч-анализом и эксергетическим пинч-анализом, а также апробацией полученных результатов в периодической печати.

Достоверность также подтверждается использованием для исследования подлинных данных установки ЭЛОУ-АТ – 6 ООО «ПО «Киришинефтеоргсинтез», подлинных показаний теплового пункта задания от ООО "Теплоэнерго", сходимостью расчетных данных с полученными результатами натуральных исследований.

Достоверность подтверждается внедрением практических результатов в проектно-конструкторскую документацию ООО «ПО «Киришинефтеоргсинтез».

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования, в проведении анализа существующих методов оценки и повышения энергоэффективности нефтеперерабатывающего завода, в разработке метода эксергетического пинч-анализа, в разработке и внедрении математической модели для проведения параметрической оптимизации эксергетическим пинч-анализом, в разработке алгоритма структурной оптимизации эксергетическим пинч-анализом, в проведении структурной и параметрической оптимизации системы теплообмена установки первичной перегонки нефти для сравнения двумя методами: традиционным пинч-анализом и эксергетическим пинч-анализом, в проведении оптимизации системы теплообмена печи в установке первичной перегонки нефти для сравнения двумя методами: традиционным пинч-анализом и эксергетическим пинч-анализом, в проведении структурной и параметрической оптимизации системы теплообмена котельного агрегата эксергетическим пинч-анализом, в проведении аналитического расчета эксергии на реальном объекте – тепловом

пункте, в разработке алгоритма и технической реализации устройства для практического измерения эксергии рабочей среды, также в проведении экспериментальных исследований потоков эксергии. Разработка, предложенная автором, награждена серебряной медалью международным салоном «Архимед 2020» и вошла в 100 лучших изобретений России.

Реализация выводов и рекомендации работы. Результаты работы внедрены и используются в различных областях промышленности: в проектно-конструкторской деятельности предприятия ООО «ПО «Киришинефтеоргсинтез», г. Кириши, при выполнении анализа эффективности системы теплоснабжения промышленного предприятия и объектов ЖКХ, при проведении энергоаудитов промышленных предприятий. Теоретические результаты работы внедрены в научно-исследовательскую работу 19.60.44 кафедры Теплотехники и Теплоэнергетики Санкт-Петербургского Горного университета.

Апробация результатов работы. Содержание и основные положения работы докладывались на: конференции на XXX международной научно-практической конференции «Достижения вузовской науки» (г. Новосибирск, Центр развития научного сотрудничества, май 2017); на международном научно-практическом форуме молодых ученых на базе Фрайбергской Горной академии (Германия, г. Фрайберг, ТУ «Фрайбергская горная академия», июнь 2017); на XV международном форуме студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет, март 2019); на международной конференции «Прикладная физика, информационные технологии и инжиниринг» (г. Красноярск, Красноярский краевой Дом науки и техники, сентябрь 2019); на международной научной конференции "Наука. Исследования. Практика" (г. Санкт-Петербург, ГНИИ «Нацразвите», декабрь 2019); на ежегодной вузовской научной конференции студентов и молодых ученых «Полезные ископаемые России и их освоение» (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет, март 2020); на XXIII Московском международном Салоне изобретений и инновационных технологий «АРХИМЕД-2020» (г. Москва, март 2020).

Публикации. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 12 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 5 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus; получен 1 патент.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 111 наименований, и 7 приложений. Диссертация изложена на 144 страницах машинописного текста, содержит 45 рисунков и 18 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проводится анализ работы теплообменного оборудования нефтеперерабатывающего завода. Приведены возможные пути повышения энергоэффективности тепловых процессов на объектах нефтеперерабатывающего завода. Проводится обзор существующих методов оценки и повышения энергоэффективности нефтеперерабатывающего завода. Представлено сравнение двух разновидностей эксергетического метода. Представлены эксергетические балансы теплоэнергетических систем.

Во второй главе представлено экспериментальное определение закономерностей и особенностей использования метода эксергетического анализа для его практического использования при анализе и оптимизации процессов теплообмена. Представлен метод практического измерения эксергии. Представлены устройство и алгоритм обеспечения метода практического измерения эксергии рабочих тел.

Третья глава посвящена разработке метода эксергетического пинч-анализа. Разработана математическая модель для проведения параметрической оптимизации эксергетическим пинч-анализом.

Представлен алгоритм структурной оптимизации эксергетическим пинч-анализом.

В четвертой главе приводятся теоретические исследования работы. Проведен анализ энергоэффективности существующей установки первичной перегонки нефти традиционным и эксергетическим пинч-анализом. Выявлено, что количество теплообменников меньше при эксергетическом пинч-анализе, чем при традиционном пинч-анализе. Проведен традиционный и эксергетический пинч-анализ источника тепловой энергии установки первичной перегонки нефти: печи. Проведена структурная и параметрическая оптимизация внешнего источника тепловой энергии – котельного агрегата

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Использование разработанного эксергетического пинч-метода, учитывающего потери эксергии, по сравнению с традиционным пинч-методом, позволяет повысить энергоэффективность тепломассообменных процессов на нефтеперерабатывающем предприятии

Проведен традиционный пинч-анализ системы теплообмена установки первичной перегонки нефти. На рисунке 1 изображены составные кривые схемы теплообмена установки ЭЛОУ-АТ-6. Составные кривые сближены до $T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$. Определены особенности тепловых процессов в установке после анализа графика составных кривых (рисунок 1): холодная составная кривая нуждается во внешнем источнике тепла, который дает 27 МВт энтальпии; горячая составная кривая требует доохлаждения 55 МВт энтальпии; теплота рекуперации данной схемы равна 159,24 МВт.

Произведена переобвязка новой системы теплообмена таким образом, чтобы разности температур по всем теплообменным аппаратам распределялись равномерно и не были меньше минимальной. Этот шаг позволит выявить наибольшую теплоту рекуперации при наименьшем потреблении энергии из внешних источников. Результаты представлены на рисунке 2.

Проведен эксергетический пинч-анализ установки первичной перегонки нефти. Проведена параметрическая оптимизация системы теплообмена установки первичной перегонки нефти. Сближенные

составные кривые представлены на рисунке 3. Составные кривые приводятся к минимальной температуре $T_{\text{мин}}=14^{\circ}\text{C}$. Определены особенности тепловых процессов в установке и даны рекомендации для повышения энергоэффективности системы: (рисунок 3):

1) Холодная составная кривая нуждается во внешнем источнике тепла, который дает 12 МВт эксергии. Таким образом, можно сформулировать рекомендации по источнику теплоты: использовать менее мощную печь или внести в нее конструктивные изменения.

2) Горячая составная кривая теряет низкопотенциальное тепло с эксергией 24 МВт. Для повышения эффективности установки можно использовать это тепло для технологических нужд.

Следующим этапом эксергетического пинч-анализа является структурная оптимизация системы теплообмена. Оптимизированная система теплообменников представлена на рисунке 4. После построения системы теплообмена выявлено, эксергетический пинч-анализ является более эффективным методом оптимизации, потому что количество теплообменников меньше при эксергетическом пинч-анализе, чем при традиционном пинч-анализе: 1) при традиционном пинч-анализе системы теплообмена установки ЭЛОУ-АТ-6 необходимо 26 теплообменников между потоками и 11 теплообменников для теплообмена с внешними энергоносителями; 2) при проведении структурной оптимизации эксергетическим пинч-анализом системе необходимо 22 теплообменника между потоками, также 9 теплообменников для обеспечения внешними энергоносителями.

Достигнута экономическая эффективность. Изменилась нагрузка внешних энергоносителей. Оценка энергоэффективности установки первичной перегонки нефти эксергетическим пинч-анализом показала, что необходимо провести более детальный анализ источников тепловой энергии.

Проведен традиционный пинч-анализ источника тепловой энергии установки первичной перегонки нефти: печи. Определены тепловые потоки для проведения анализа системы теплообмена печи. Построенные составные кривые тепловых потоков печи, представлены на рисунке 5. Энтальпийный метод показал, что

горячие тепловые потоки печи почти целиком отдают свое тепло холодным потокам.

Проведена параметрическая оптимизация печи установки первичной перегонки нефти эксергетическим пинч-анализом. Преобразованные составные кривые методом эксергетического пинч-анализа представлены на рисунке 6. Выявлено, что традиционный пинч-анализ не дает предложений по уменьшению потерь эксергии. Эксергетический пинч-анализ показывает, что необходимо уменьшать потери в радиантной секции печи (верхний участок горячей составной кривой рисунка 6)

Проведена структурная и параметрическая оптимизация внешнего источника тепловой энергии – котельного агрегата, эксергетическим пинч-анализом. Преобразованные тепловые потоки котельного агрегата в горячую составную кривую и холодную составную кривую, при помощи математической модели, представлены в системе координат «эксергия–температура» на рисунке 7. Спроектирована оптимизированная структура теплообменников методом эксергетического пинч-анализа, представленная на рисунке 8. Предложены меры для повышения энергоэффективности тепломассообменных процессов на нефтеперерабатывающем предприятии: ниже точки пинча холодным потоком является воздух в воздухоподогревателе, следовательно, необходимо увеличить площадь поверхности нагрева воздухоподогревателя, с целью минимизации потерь эксергии.

2. Измерение эксергии рабочих тел в энергетических системах достигается при использовании метода, учитывающего взаимное влияние параметров рабочего тела и температуры окружающей среды, реализованного в запатентованном устройстве

Представлен алгоритм и устройство обеспечения метода практического измерения эксергии рабочих тел. Устройство для измерения эксергии рабочего тела поясняется рисунками 9 и 10.

Создана экспериментальная установка, которая моделирует систему отопления с качественным регулированием, к которой подключено устройство для измерения эксергии. Принципиальная схема и действительная модель установки представлены на рисунке

11 и 12, соответственно. Устройство для измерения эксергии выводит данные на дисплей и передает компьютеру.

Для анализа результатов были выделены периоды, когда разность между температурами на входе и на выходе постоянна. На рисунке 13 представлены зависимости количества теплоты и эксергии от температуры на входе.

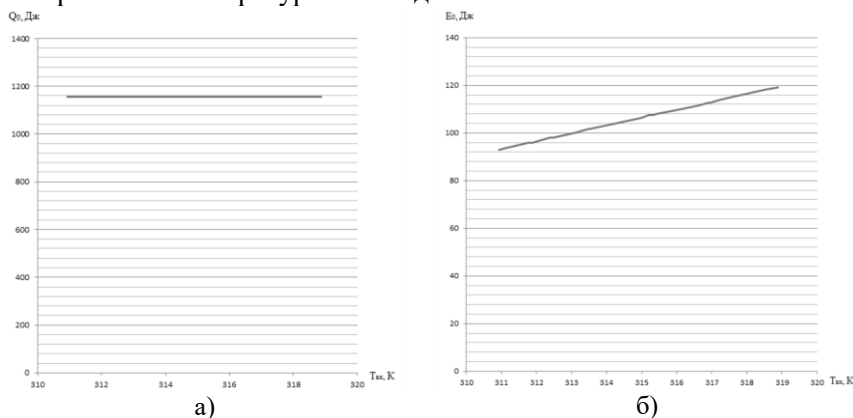


Рисунок 13 – Сравнение энергетического и эксергетического балансов в оценке состояния системы:

а – энергетический подход, б – эксергетический подход

Энтальпийный подход показал, что количества теплоты остается постоянным при одинаковой разности температур, следовательно, и количество топлива постоянно. Однако с точки зрения эксергетического метода определено, что эксергия увеличивается с возрастанием температуры на входе (даже при постоянной разности температур), следовательно, и расход топлива увеличивается с возрастанием начальной температуры.

3. Разработанная математическая модель, формализующая процесс представления исходных данных, построение составных кривых и их оптимизацию на температурно-эксергетической плоскости, позволяет провести параметрическую оптимизацию систем теплообмена нефтеперерабатывающего предприятия, и на ее основе проводится структурная оптимизация систем теплообмена эксергетическим пинч-анализом

Система теплообмена является оптимальной, когда потери эксергии стремятся к минимуму. Данное выражение представлено формулой (1):

$$\sum \Delta E \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $\sum \Delta E$ – сумма потерь эксергии в системе.

Для этого необходимо, чтобы рекуперации эксергии горячих и холодных потоков была максимальна, следовательно, разность эксергий горячих и холодных потоков стремилась к минимуму. В большинстве случаев для работоспособности системы теплообмена необходимы внешние энергоносители. Они в свою очередь накладывают финансовую нагрузку на предприятие. Таким образом, суммы эксергий внешних горячих и холодных энергоносителей (утилит) необходимо приводить к минимуму. С учетом выше изложенного, для оптимизации системы теплообмена, помимо сближения составных кривых до ΔT_{\min} , следует воспользоваться формулой (2):

$$\begin{aligned} \sum \Delta E &= |e_h| - |e_c| + |E_{UH}| - |E_{UC}|, & (2) \\ |e_h| - |e_c| &\rightarrow \min, \\ \sum E_{UH} &\rightarrow \min, \\ \sum E_{UC} &\rightarrow \min. \end{aligned}$$

где e_h – эксергия горячей составной кривой, e_c – эксергия холодной составной кривой, E_{UH} – эксергия внешних горячих энергоносителей, E_{UC} – эксергия внешних холодных энергоносителей.

Ограничения: для горячих потоков $T_{г1} < T_{г2} < \dots < T_{г(k-1)} < T_{гk}$; для холодных потоков $T_{х1} < T_{х2} < \dots < T_{х(k-1)} < T_{хk}$; математическая модель подходит для потоков без фазовых переходов.

Исходные данные для модели построения составных кривых формируются в виде четырех матриц. Первая матрица, формула (3), включает в себя исходные данные горячих потоков (Hot), вторая матрица, формула (4), включает в себя исходные данные холодных потоков (Cold). Количество горячих потоков обозначается буквой n , количество холодных потоков – m . В этих двух матрицах указываются: начальные и конечные температуры потоков, температура окружающей среды, натуральный логарифм отношения

начальной и конечной температуры потоков, также потоковая теплоемкость (произведение удельной теплоёмкости на массовый расход). Единица измерения температур в Кельвинах. Третья и четвертая матрица, формула (5) и (6) соответственно, состоят из оригинальных значений первых двух столбцов матриц E_H и E_C , соответственно. При этом все температуры в этих базисах сортируются по возрастанию, то есть $T_1 < T_2 < \dots < T_{k-1} < T_k$.

Функциональные зависимости, формирующие составную кривую горячих потоков и холодных потоков, имеют вид (7) и (8), где n -количество тепловых потоков на заданном интервале.

В них с нарастающим итогом суммируются тепловые потоки, сформированные на основании матриц исходных данных E_H (3) и E_C (4). При этом разбиваем тепловые потоки горячей матрицы E_H и холодной матрицы E_C по температурным интервалам матриц T_H (5) и T_C (6). В результате преобразований получаем две другие формулы для построения горячей составной кривой и холодной составной кривой, соответственно e_h (7) и e_c (8).

Итак, получаем две составные функции горячих и холодных потоков. То есть имеем две функции $e_h(T)$ и $e_c(T)$, представляющие собой соответственно суммарные эксергии всех горячих и холодных потоков в диапазоне температур от T_1 до T_k .

В процессе оптимизации возникает необходимость процедуры сближения составных кривых относительно оси абсцисс до ΔT_{min} , учитывая критерий оптимизации, представленный формулами (1) и (2).

На основе параметрической оптимизации систем теплообмена проводится структурная оптимизация эксергетическим пинч-анализом. Разработан алгоритм структурной оптимизации эксергетическим пинч-анализом, который позволят построить оптимизированную сеть теплообменников. При проектировании теплообменных систем используется ряд правил традиционного пинч-метода, только вместо энтальпийных балансов используются эксергетические балансы:

1)Разделение задачи на две отдельные: тепловые потоки до пинча и тепловые потоки после пинча.

2)Построение теплообменных связей для каждой из задач начинается на пинче и движется в сторону от него.

3) Для построения теплообменных связей, следует воспользоваться алгоритмом, который представлен на рисунке 14.

4) Потоки, требования по эксергии которых удовлетворены, выделяются отметкой. Таким образом, наглядно видно, какие потоки еще необходимо задействовать в теплообмене.

5) Затем заполняем остаток.

Для определения температур между теплообменниками следует использовать формулу (9):

$$Ex = CP \cdot \left[T_1 - T_2 - T_0 \cdot \ln \frac{T_1}{T_2} \right] \quad (9)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи: повышение энергоэффективности тепломассообменных процессов на нефтеперерабатывающем предприятии методом эксергетического пинч-анализа, основанного на разработанной математической модели и оригинального метода измерения эксергии. Основные научные положения диссертации и приведенные технические разработки способствуют дальнейшему развитию эксергетического анализа с целью повышения энергоэффективности тепломассообменных процессов, определяют необходимость поиска путей по снижению потерь эксергии топлива в теплоэнергетическом оборудовании.

Основные научные и практические выводы:

1. Проведен анализ существующих методов оценки и повышения энергоэффективности нефтеперерабатывающего завода. Выявлено, что существующие методы не позволяют провести структурную и параметрическую оптимизацию системы с учетом минимизации потерь эксергии.

2. Разработан практический метод измерения эксергии рабочих тел, учитывающего взаимное влияние параметров рабочего тела и температуры окружающей среды: представлен алгоритм и техническая реализация устройства для практического измерения эксергии.

3. В ходе проведения экспериментов на установке было выявлено: при одинаковой разности температур на входе и на выходе энтальпийный метод показывает, что количество топлива остается постоянным при повышении температуры теплоносителя.

Эксергетический метод показывает, что расход топлива возрастает с увеличением температуры теплоносителя, при одинаковой разности температур на входе и на выходе.

4. Разработан метод эксергетического пинч-анализа объединяющий в себе преимущества эксергетического и пинч-метода для повышения энергоэффективности нефтеперерабатывающего предприятия. Этот метод позволяет оценить энергоэффективность системы и провести структурную и параметрическую оптимизацию с минимальными потерями эксергии. Разработана и внедрена в проектно-конструкторскую деятельность предприятия ПО ООО «Киришинефтеоргсинтез» математическая модель для проведения параметрической оптимизации эксергетическим пинч-анализом. Разработан алгоритм структурной оптимизации эксергетическим пинч-анализом.

5. Проведена структурная и параметрическая оптимизация системы теплообмена установки первичной перегонки нефти для сравнения двумя методами: традиционным пинч-анализом и эксергетическим пинч-анализом. Традиционный пинч-анализ не дает предложений по уменьшению потерь эксергии. Проведя эксергетический пинч-анализ установки первичной перегонки нефти, предложены меры для повышения энергоэффективности тепломассообменных процессов на нефтеперерабатывающем предприятии. При построение оптимизированной системы теплообмена при традиционном пинч-анализе количество теплообменников больше, чем при эксергетическом.

6. Проведена параметрическая оптимизация системы теплообмена печи в установке первичной перегонки нефти для сравнения двумя методами: традиционным пинч-анализом и эксергетическим пинч-анализом. Традиционный пинч-анализ показал, что система теплообмена печи оптимальна, т.е. горячие тепловые потоки печи почти целиком отдают свое тепло холодным потокам. Эксергетический пинч-анализ показал, что есть потери эксергии в радиантной секции печи.

7. Проведена структурная и параметрическая оптимизация системы теплообмена котельного агрегата эксергетическим пинч-анализом. Предложены меры для повышения энергоэффективности тепломассообменных процессов на нефтеперерабатывающем предприятии.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Юшкова, Е.А. Эксергетический анализ котла посредством пинч-метода/ Е.А. Юшкова, В.А. Лебедев// Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2019. – № 21 (4). – С. 58-65.

2. Юшкова, Е.А. Эксергетический пинч-анализ системы теплообмена в технологии переработки нефти/ Е.А. Юшкова, В.А. Лебедев// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия "Энергетика". 2020. – № 20 (1). – С. 5-11.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

1. Yushkova, E. A. Optimization of the boiler using the pinch method and exergy method/ E. A. Yushkova, V. A. Lebedev, P. V. Yakovlev// IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – №378. – p. 012052. doi:10.1088/1755-1315/378/1/012052

2. Yushkova, E. A. Exergy pinch analysis of the primary oil distillation unit/ E. A. Yushkova, V. A. Lebedev // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – №1399. – p. 044072.

3. Lebedev, V.A. Exergy pinch analysis of a furnace in a primary oil refining unit/ V.A. Lebedev, E.A. Yushkova, I.S. Churkin//E3S Web of Conferences (TPACEE 2019) – 2019. – Vol. 124. – pp 00001 doi.org/10.1051/e3sconf/202016402011

4. Lebedev, V.A. Mathematical Model for Optimization of Heat Exchange Systems of a Refinery. / V.A. Lebedev, E.A. Yushkova // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 161. – p. 01001.

5. Lebedev, V.A. Mathematical model for optimization of heat exchange systems /V.A. Lebedev, E.A. Yushkova// E3S Web of Conferences (SES-2019). – 2020. – Vol. 164. – pp 02011.

Патенты: Патент на изобретение № 2702701 Российская Федерация. МПК G01K 17/08, F24D 10/00. Устройство для измерения эксергии рабочей среды : №201910532 : заявл. 26.11.2018 : опубл. 10.09.2019 /Юшкова Е.А., Лебедев В.А.// заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 11 с.

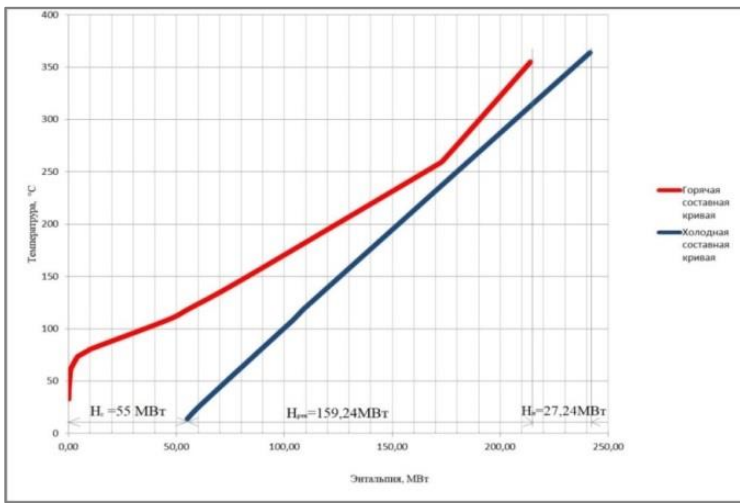


Рисунок 1 – Графическое изображение составных кривых системы теплообмена установки ЭЛОУ-АТ-6 традиционным пинч-анализом

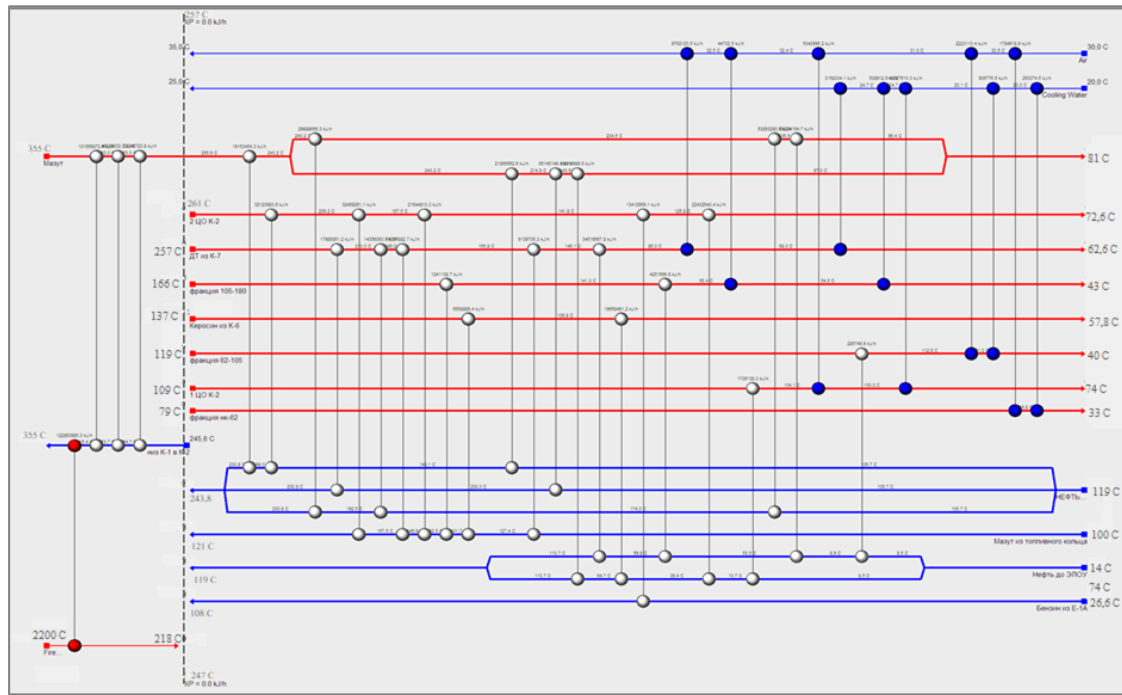


Рисунок 2 – Система теплообмена установки ЭЛОУ АТ-6 после преобразования традиционным пинч-методом

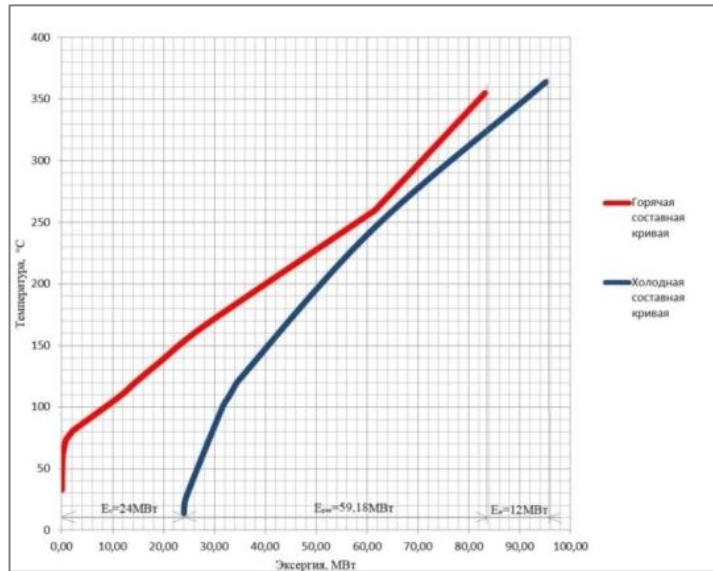


Рисунок 3 – Преобразованные тепловые потоки в системе координат «эксергия-температура» системы теплообмена установки ЭЛОУ-АТ-6

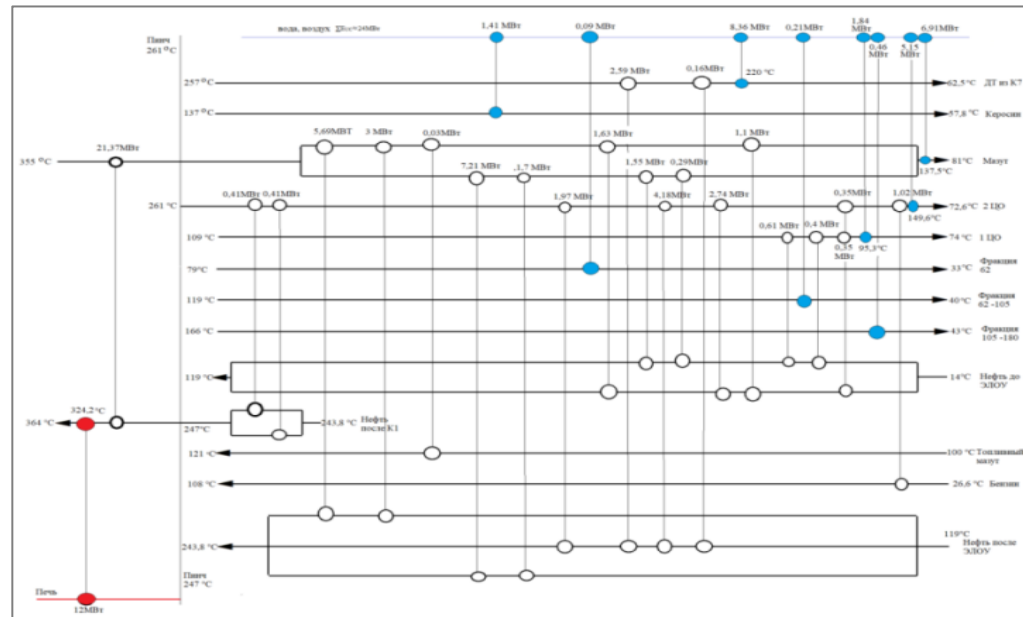


Рисунок 4 – Оптимизированная система теплообменников методом эксергетического пинч-анализа

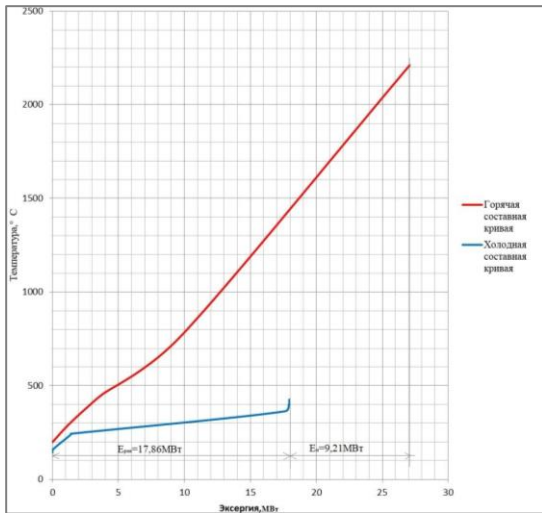


Рисунок 5 – Преобразованные тепловые потоки печи в системе координат «энтальпия – температура»

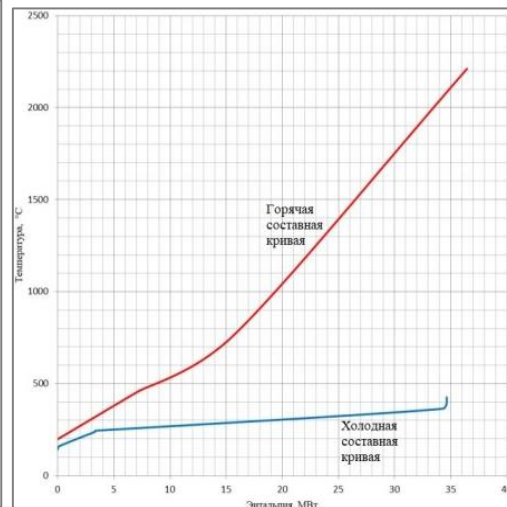


Рисунок 6 – Преобразованные тепловые потоки печи в системе координат «эксергия - температура»

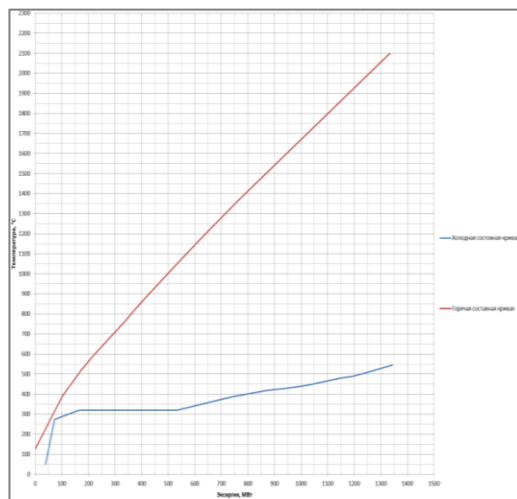


Рисунок 7 – Составные кривые котельного агрегата в системе координат «эксергия - температура»

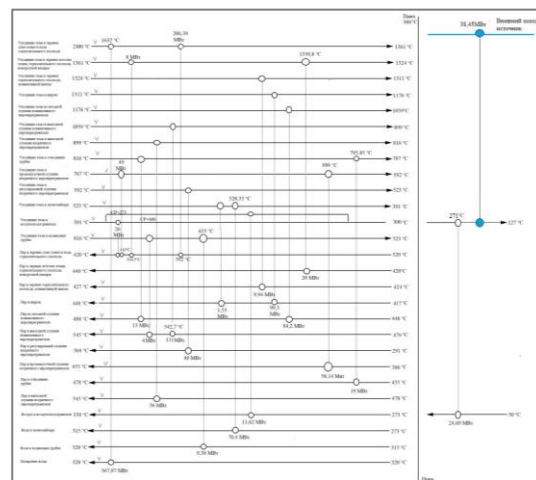


Рисунок 8 – Оптимизированная система теплообмена котельного агрегата эксергетическим пинч-анализом

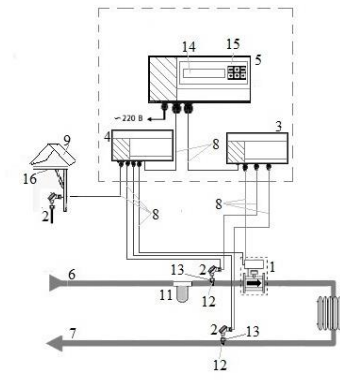


Рисунок 9 – Общая схема устройства

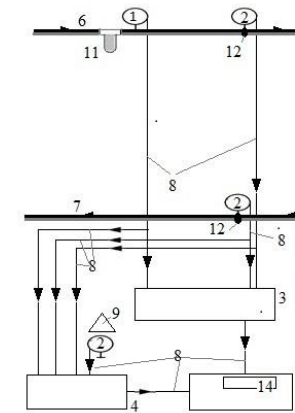


Рисунок 10 – Принципиальная схема устройства

- 1 – электромагнитный первичный преобразователь расхода;
 2 – термопреобразователь сопротивления; 3 – тепловычислитель;
 4 – вычислитель эксергии; 5 – устройство учета; 6 – подающий трубопровод;
 7 – обратный трубопровод; 8 – электрический кабель;
 9 – козырек; 10 – потребитель; 11 – фильтр; 12 – защитная гильза;
 13 – бобышка; 14 – дисплей; 15 – кнопки управления; 16 – кронштейн

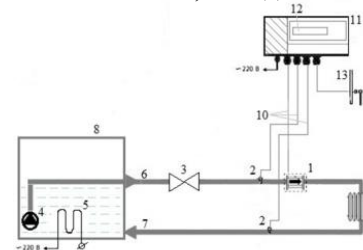


Рисунок 11 – Принципиальная схема установки

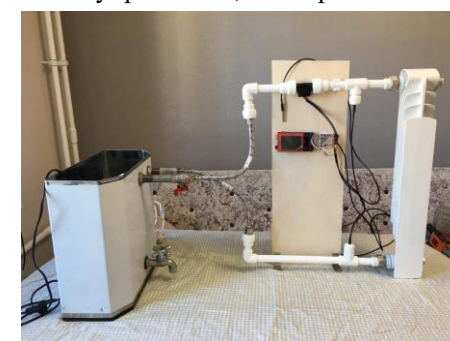


Рисунок 12 – Система отопления и подключенное к ней устройство для измерения эксергии

- 1 – датчик расхода воды; 2 – датчик температуры; 3 – кран шаровый;
 4 – погружной насос; 5 – нагревательный элемент; 6 – подающий трубопровод;
 7 – обратный трубопровод; 8 – бак; 9 – потребитель;
 10 – электрический кабель; 11 – контроллер; 12 – дисплей; 13 – стенд

$$E_H = \begin{pmatrix} T_{г.н1} & T_{г.к1} & T_{0г1} & \ln \frac{T_{г.н1}}{T_{г.к1}} & CP_{г.1} \\ T_{г.н2} & T_{г.к2} & T_{0г2} & \ln \frac{T_{г.н2}}{T_{г.к2}} & CP_{г.2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{г.нn-1} & T_{г.кn-1} & T_{0гn-1} & \ln \frac{T_{г.нn-1}}{T_{г.кn-1}} & CP_{г.n-1} \\ T_{г.нn} & T_{г.кn} & T_{0гn} & \ln \frac{T_{г.нn}}{T_{г.кn}} & CP_{г.n} \end{pmatrix} \quad (3) \quad E_C = \begin{pmatrix} T_{х.н1} & T_{х.к1} & T_{0х1} & \ln \frac{T_{х.н1}}{T_{х.к1}} & CP_{х.1} \\ T_{х.н2} & T_{х.к2} & T_{0х2} & \ln \frac{T_{х.н2}}{T_{х.к2}} & CP_{х.2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{х.нm-1} & T_{х.км-1} & T_{0хm-1} & \ln \frac{T_{х.нm-1}}{T_{х.км-1}} & CP_{х.m-1} \\ T_{х.нm} & T_{х.км} & T_{0хm} & \ln \frac{T_{х.нm}}{T_{х.км}} & CP_{х.m} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$T_H = \begin{pmatrix} T_{г.1} \\ T_{г.2} \\ \dots \\ T_{г.k-1} \\ T_{г.k} \end{pmatrix}, \quad T_C = \begin{pmatrix} T_{х.1} \\ T_{х.2} \\ \dots \\ T_{х.k-1} \\ T_{х.k} \end{pmatrix} \quad (6)$$

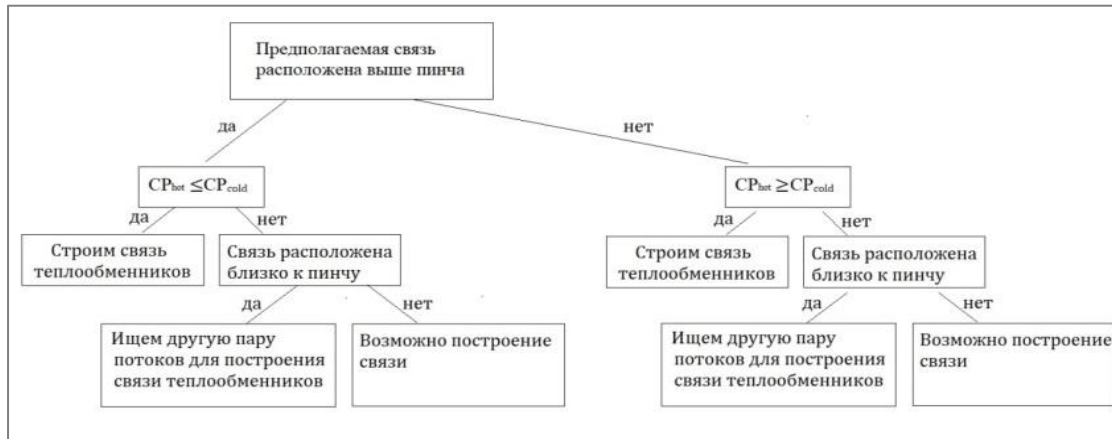


Рисунок 14 – Алгоритм для построения связи между теплообменниками

Функциональные зависимости, формирующие составную кривую горячих потоков

для первого температурного интервала:

$$e_h = \left(T_{г2} - T_{г1} - T_0 \ln \frac{T_{г2}}{T_{г1}} \right) \sum_{i=1}^n CP_{гi} \Big|_{T_{г1}}^{T_{г2}}, T_{г1} < T_{г2};$$

для первого и второго температурных интервалов:

$$e_h = \left(T_{г2} - T_{г1} - T_0 \ln \frac{T_{г2}}{T_{г1}} \right) \sum_{i=1}^n CP_{гi} \Big|_{T_{г1}}^{T_{г2}} + \left(T_{г3} - T_{г2} - T_0 \ln \frac{T_{г3}}{T_{г2}} \right) \sum_{i=1}^n CP_{гi} \Big|_{T_{г2}}^{T_{г3}}, T_{г1} < T_{г2} < T_{г3};$$

для (k-1)-х температурных интервалов:

$$e_h = \sum_{j=1}^{j=k-1} \left[\left(T_{гj} - T_{г(j-1)} - T_0 \ln \frac{T_{гj}}{T_{г(j-1)}} \right) \sum_{i=1}^n CP_{гi} \Big|_{T_{г(j-1)}}^{T_{гj}} \right] + \left(T_{гk} - T_{г(k-1)} - T_0 \ln \frac{T_{гk}}{T_{г(k-1)}} \right) \sum_{i=1}^n CP_{гi} \Big|_{T_{г(k-1)}}^{T_{гk}}, T_{г(k-2)} < T_{г(k-1)} < T_{гk};$$

для k-х температурных интервалов:

$$e_h = \sum_{j=1}^{j=k} \left[\left(T_{гj} - T_{г(j-1)} - T_0 \ln \frac{T_{гj}}{T_{г(j-1)}} \right) \sum_{i=1}^n CP_{гi} \Big|_{T_{г(j-1)}}^{T_{гj}} \right], T_{г(k-1)} < T_{гk}. \quad (7)$$

Функциональные зависимости, формирующие составную кривую холодных потоков

для первого температурного интервала:

$$e_c = \left(T_{х2} - T_{х1} - T_0 \ln \frac{T_{х2}}{T_{х1}} \right) \sum_{i=1}^n CP_{хи} \Big|_{T_{х1}}^{T_{х2}}, T_{х1} < T_{х2};$$

для первого и второго температурных интервалов:

$$e_c = \left(T_{х2} - T_{х1} - T_0 \ln \frac{T_{х2}}{T_{х1}} \right) \sum_{i=1}^n CP_{хи} \Big|_{T_{х1}}^{T_{х2}} + \left(T_{х3} - T_{х2} - T_0 \ln \frac{T_{х3}}{T_{х2}} \right) \sum_{i=1}^n CP_{хи} \Big|_{T_{х2}}^{T_{х3}}, T_{х1} < T_{х2} < T_{х3};$$

для (k-1)-х температурных интервалов:

$$e_c = \sum_{j=1}^{j=k-1} \left[\left(T_{хj} - T_{х(j-1)} - T_0 \ln \frac{T_{хj}}{T_{х(j-1)}} \right) \sum_{i=1}^n CP_{хи} \Big|_{T_{х(j-1)}}^{T_{хj}} \right] + \left(T_{хk} - T_{х(k-1)} - T_0 \ln \frac{T_{хk}}{T_{х(k-1)}} \right) \sum_{i=1}^n CP_{хи} \Big|_{T_{х(k-1)}}^{T_{хk}}, T_{х(k-2)} < T_{х(k-1)} < T_{хk};$$

для k-х температурных интервалов:

$$e_c = \sum_{j=1}^{j=k} \left[\left(T_{хj} - T_{х(j-1)} - T_0 \ln \frac{T_{хj}}{T_{х(j-1)}} \right) \sum_{i=1}^n CP_{хи} \Big|_{T_{х(j-1)}}^{T_{хj}} \right], T_{х(k-1)} < T_{хk}. \quad (8)$$