

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования «Санкт-Петербургский горный университет»

*На правах рукописи*

**Юшкова Екатерина Александровна**



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

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

Диссертация на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук,  
профессор **Лебедев В.А.**

Санкт-Петербург – 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1 ОБЗОР МЕТОДОВ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СИСТЕМ ТЕПЛООБМЕНА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ .....	11
1.1 Анализ работы теплообменного оборудования НПЗ .....	12
1.2 Возможные пути повышения энергоэффективности тепловых процессов на НПЗ .....	16
1.3 Методы оценки и повышения энергоэффективности нефтеперерабатывающего завода .....	18
1.3.1 Повышение энергоэффективности на основе пинч-анализа .....	20
1.3.2 Энтальпийный метод .....	20
1.3.3 Разновидности эксергетического анализа тепловых установок .....	22
1.3.4 Эксергетические балансы теплоэнергетических систем .....	25
1.4 Выводы по главе 1 .....	31
ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ И ОСОБЕННОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ЕГО ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ .....	32
2.1 Экспериментальные исследования потоков эксергии в системах учета и распределения тепла .....	32
2.2 Алгоритм и техническая реализация устройства для измерения эксергии рабочей среды .....	38
2.2.1 Устройство для измерения эксергии рабочей среды .....	38
2.2.2 Программа для вычисления эксергии рабочей среды .....	42
2.3 Экспериментальные исследования потоков эксергии при качественном регулировании ..	44
2.4 Выводы по главе 2 .....	55
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО ПИНЧ-АНАЛИЗА .....	56
3.1 Формирование потоков эксергии .....	56
3.2 Определение наименьшего теплового напора .....	57
3.3 Параметрическая оптимизация систем теплообмена эксергетическим пинч-анализом .....	58
3.4 Структурная оптимизация системы теплообменников методом эксергетического пинч-анализа .....	65
3.5 Выводы по главе 3 .....	68
ГЛАВА 4 СТРУКТУРНАЯ И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ ТЕПЛООБМЕНА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИМ ПИНЧ-АНАЛИЗОМ .....	69
4.1 Эксергетический пинч-анализ установки первичной перегонки нефти .....	69
4.1.1 Анализ действующей установки первой перегонки нефти .....	69
4.1.2 Традиционный пинч-анализ установки ЭЛОУ-АТ-6 .....	74
4.1.3 Оптимизация установки ЭЛОУ-АТ-6 методом эксергетического пинч-анализа .....	78
4.2 Анализ системы теплообмена печи в установке первичной перегонки нефти .....	85

4.2.1 Традиционный пинч-анализ печи .....	88
4.2.2 Эксергетический пинч-анализ печи .....	91
4.3 Анализ котельного агрегата.....	94
4.4 Выводы по главе 4 .....	105
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	106
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	108
ПРИЛОЖЕНИЕ А Исходные данные и рассчитанное по ним количество теплоты и эксергии	117
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патент на изобретение .....	120
ПРИЛОЖЕНИЕ В Диплом «Архимед 2020» .....	121
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Данные показаний устройства для измерения эксергии.....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акт внедрения .....	141
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Показания приборов установки ЭЛОУ-АТ-6.....	142
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Оптимизированная система теплообменников котельного агрегата эксергетическим пинч-анализом.....	144

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы исследования

Топливо-энергетический комплекс в России потребляет значительную часть производимой энергии (45%). Повышение энергоэффективности топливо-энергетического комплекса является важной задачей государства [50]. 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» [51].

– «Государственная программа Российской Федерации «Развитие энергетики», срок реализации продлен на период до 2024 года» [24].

– «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 топливо-энергетического комплекса России, относятся «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии».

На данный момент экономически наиболее значимой составной частью топливо-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 топливо-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%» [56, 74, 13].

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. [77].

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 [22]. 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» [22].

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 [2].

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 [19, 18, 83].

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 [66].

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., Андрющенко А.И., Рубинштейна Я.М., Щепетильникова М.И. и др. [75, 26, 64, 32, 6]. В данных работах изложены теоретические основы эксергетического анализа.

Богданов А.Б. в статье [13] доказывает, что применение понятий эксергия и анергия позволяет производить классификацию качества тепловой и электрической энергии.

Цацаронис (Tsatsaronis G.) и Мунг-Хо (Moung-Ho P.) [108] были первыми, кто разработал концепцию предотвратимого и неизбежного разрушения эксергии, которые были

использованы для определения потенциала улучшения термодинамических характеристик и экономической эффективности системы.

Многие современные ученые рассматривают термодинамические процессы, используя эксергетический анализ [107, 89].

Линнхофф Б., Клемеш Й., Товажнянский Л.Л. и Смит Р. первыми детально описали технологию проведения пинч-анализа [96, 106].

Рашиди Жуан и Агапов Д. С. исследовали системы с помощью эксергетического и пинч-анализа [102, 2]. 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., Ульев Л.М., Мельниковская Л.А., Ходченко С.М. в своей статье рассмотрели установку первичной перегонки нефти как объект пинч-анализа, провели компьютерное моделирование установки, разработали проект оптимизационной схемы и разработали метод для наиболее точного определения полезной тепловой нагрузки трубчатых печей [45]. Хидиятуллин А.С., Гареева И.Ю., Руднев Н.А., Абызгильдин А.Ю. использовали пинч-анализ для схемы установки ЭЛОУ АТ-3, предложили новую структуру обвязки теплообменников, которая, по сравнению с существующей, является более оптимальной [73]. 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 не оптимальность 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 «Нацразвитие», 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, 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.

## ГЛАВА 1 ОБЗОР МЕТОДОВ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СИСТЕМ ТЕПЛООБМЕНА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Россия занимает второе место в мире по добыче черного золота [55], это видно из диаграммы, представленной на рисунке 1.1.

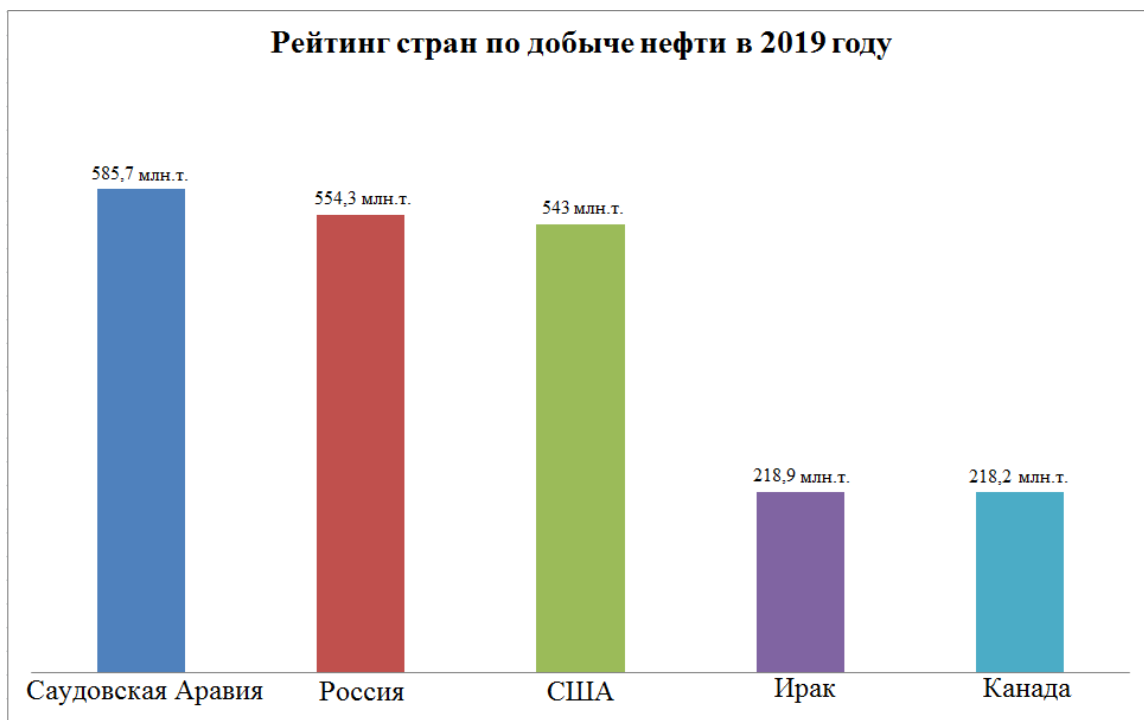


Рисунок 1.1 – Рейтинг стран по добыче нефти 2019 г

В 2018 году, по данным «ЦДУ ТЭК», общий объем первичной переработки нефтяного сырья на НПЗ России увеличился на 2,5% (или на 7 млн т) по сравнению с аналогичным периодом 2017 года и составил 286,9 млн тонн [71].

Нефтеперерабатывающий завод (НПЗ) состоит из сложных последовательных технологических цепочек, каждая из которых заканчивается производством определенного компонента товарного топлива или других нефтепродуктов [4, 9].

Типовая структура нефтепереработки включает 3 основные стадии: разделение нефти на фракции, выработка товарной продукции, приготовление и отгрузка готовой продукции с заданными показателями качества. В работе Сетина С.П. стадии нефтепереработки описываются следующим образом: «Каждая стадия реализуется как сложная совокупность взаимосвязанных последовательных операций по преобразованию потоков сырья и энергии: нагрев, конденсация, охлаждение, диффузия, физическое смешение или разделение потоков,

химические превращения, массообмен и др. При этом отдельные стадии связаны между собой различными энергетическими и материальными потоками» [65].

Процессы переработки нефти нуждаются во внешних источниках тепловой энергии: нагрев нефти в печах, выработка пара от котельных агрегатов. Переработка нефти является энергоемким и ресурсозатратным производством, особенно первичная перегонка нефти [65].

Анализ нефтеперерабатывающих предприятий показывает, что их потенциал энергосбережения составляет 10-20%. Данные предприятия имеют высокий уровень потерь тепловой энергии и низкую рекуперацию тепла. Потери тепла равны:

- с хладагентами – 36%;
- с дымовыми газами технологических печей – 16%;
- в окружающую среду от горячих поверхностей оборудования –12-14% [78].

### **1.1 Анализ работы тепломассообменного оборудования НПЗ**

В процессе первичной перегонки происходит разделение нефти на отдельные виды углеводородов и фракций, с целью получения продукции: бензин, дизельное топливо, различные виды машинного масла.

Нефть разделяется на фракции путем перегонки в ректификационных колоннах, данный процесс происходит из-за различия температур испарения различных углеводородов [39]. При этом нефть нагревается до температуры не выше 360 °С. Выше нагревать нефть недопустимо, так как теплообменное оборудование может выйти из строя, при этом нарушается технология переработки.

Печи и нагреватели подогревают нефть до определенных температур, нагревательное оборудование затрачивает большое количество энергетических ресурсов. В статье описывается топливо для трубчатых печей:

- 1) «природный газ – поступающий на НПЗ извне;
- 2) углеводородные газы, выделяемые из нефти при ее переработке на заводе;
- 3) мазут – смесь тяжелых нефтяных остатков с разных технологических установок НПЗ» [48].

Многие технологические установки НПЗ включают в себя печи. Для того чтобы гарантировать подачу топлива при аварии на топливопроводе, на заводах существует единая заводская система (колец) топливного газа и жидкого топлива.

К особенностям печей и другого оборудования с реализацией процессов горения относятся: высокие температуры в зоне сжигания топлива (радиантная камера или топка;

жаровые трубы); недостаточная эффективность использования тепла и потери тепла с дымовыми газами.

Печи на установках НПЗ обладают многотопливностью, это позволяет регулировать подачу топлива исходя из текущей ценовой и производственной ситуации [39].

Печи имеют разновидности:

- цилиндрические и коробчатые;
- однокамерные и многокамерные;
- с вертикальным, горизонтальным и спиральным радиантным змеевиком [39].

Продукты на выходе из установки первичной перегонки нефти имеют высокую температуру, перед отправкой на хранение или переработку продукты охлаждают в системе теплообменников. Система теплообменников позволяет обеспечить рекуперацию тепла между холодной нефтью и горячими продуктами установки, тем самым снизив затраты на внешние энергоресурсы.

На многих установках первичной переработки нефти существует система теплообменников до блока электрообессоливающей установки (ЭЛОУ) и после него, схемы этих систем теплообмена представлены соответственно на рисунке 1.2 и рисунке 1.3.

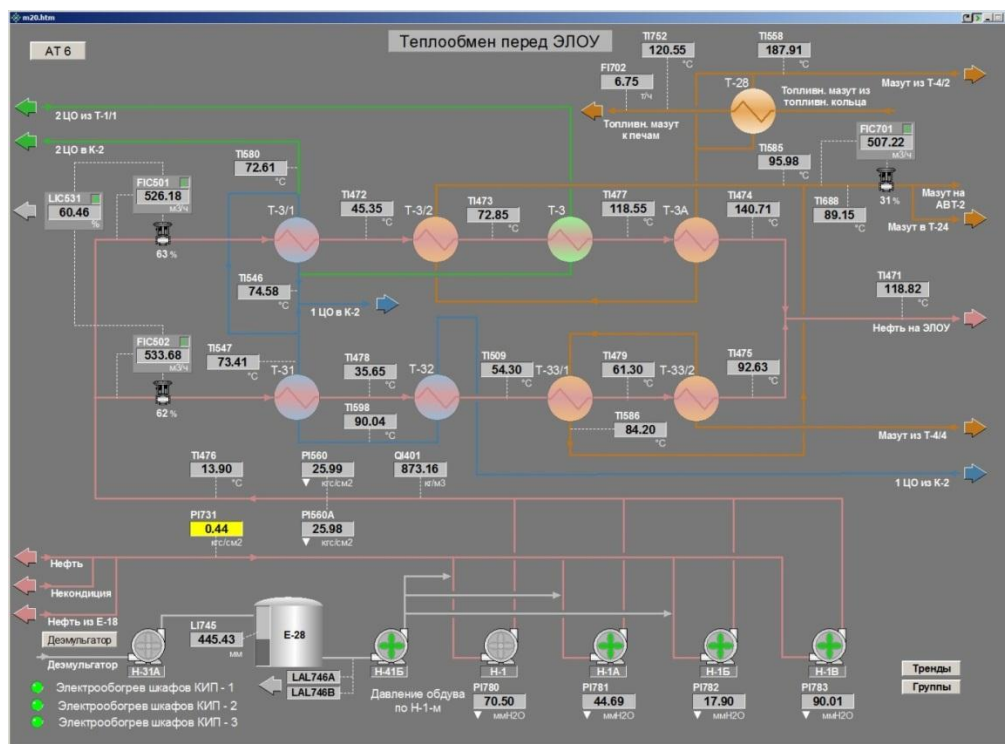


Рисунок 1.2 – Система теплообмена до блока электрообессоливающей установки

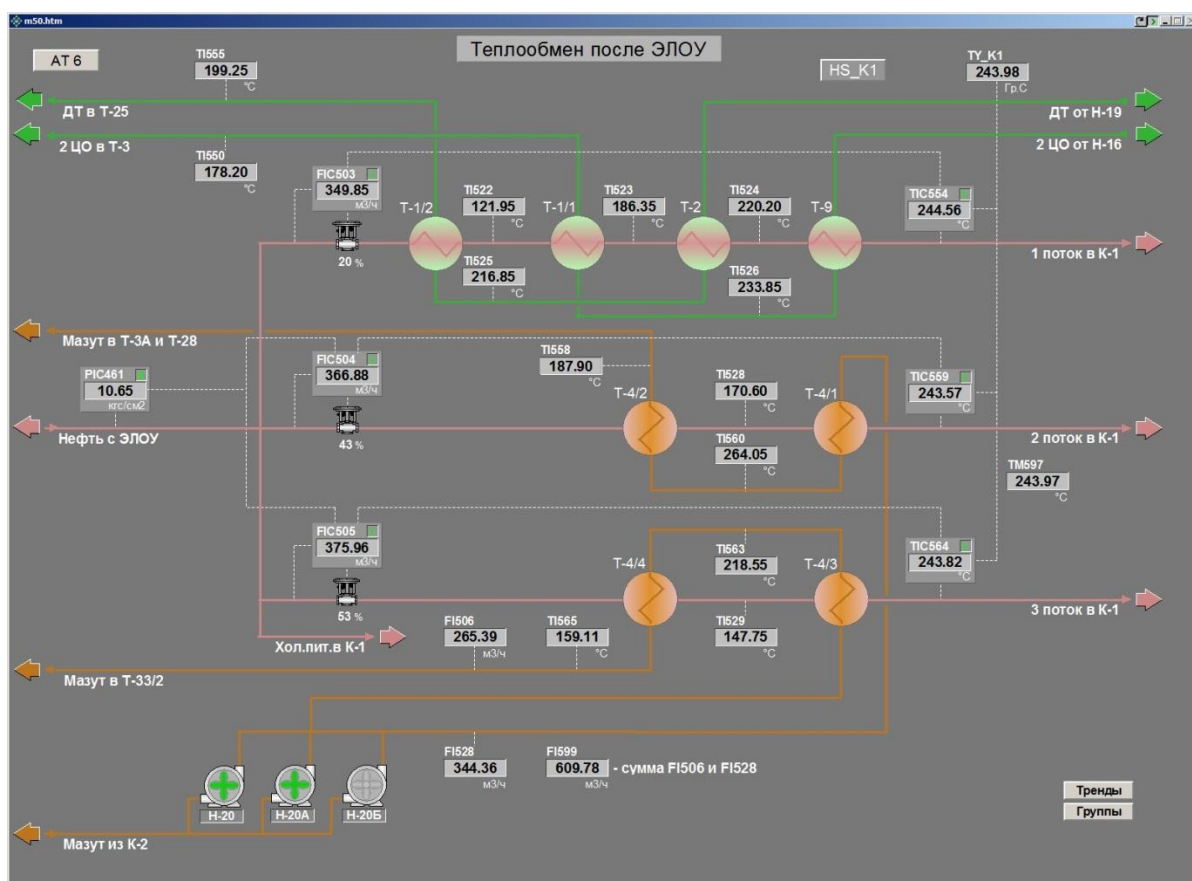


Рисунок 1.3 – Система теплообмена после блока электрообессоливающей установки

Системы теплообменников до и после ЭЛОУ включают в себя большое количество потоков. Данные потоки пересекаются между собой несколько или даже более раз, создавая сложную, разветвлённую систему теплообмена.

Анализ существующих систем теплообменников показывает их недостаточную энергоэффективность. Иррациональная обвязка систем теплообменников приводит к потерям тепловой энергии. Следовательно, необходимо проводить структурную и параметрическую оптимизацию системы теплообменников, с учетом их сложной структуры. Оптимизация системы теплообменников позволит увеличить рекуперацию тепла, тем самым уменьшая количество горячих и холодных ресурсов извне.

На установках атмосферно-вакуумной перегонки применяют укрупненные теплообменники типа «труба в трубе» и «с плавающей головкой».

Теплообменники с плавающей головкой хорошо обеспечивают компенсацию температурных удлинений корпуса и трубного пучка, за счет своей конструкции. Трубный пучок вытаскивается вместе с плавающей головкой, это позволяет просто очистить межтрубное пространство.

Недостатки теплообменников с плавающей головкой:

- относительно сложная конструкция;
- большой расход металла на единицу поверхности;

- нет доступа для осмотра плавающей головки.

Конденсаторы и холодильники имеет разновидности:

-змеевики из гладких или ребристых труб,

-в виде одноходовых и многоходовых кожухотрубчатых аппаратов.

На установках атмосферной перегонки используют аппараты воздушного охлаждения, которые позволяют уменьшить расходы воды на НПЗ. Аппараты воздушного охлаждения имеют поверхность охлаждения, сконструированную из секций оребренных труб, систему подачи воздуха и регулирующие устройства для изменения расхода воздуха.

Для процесса перегонки нефти необходима подача пара, для этих целей используют котельные агрегаты. Котельные агрегаты могут быть расположены в котельной при заводе или на ТЭЦ. На территории многих нефтеперерабатывающих заводов существуют собственные ТЭЦ. Например, ТЭЦ Куйбышевского нефтеперерабатывающего завода обеспечивает теплом весь завод и на 70% электроэнергией, а также обеспечивает теплом другие организации и жилые дома в близлежащем районе. На ТЭЦ установлены четыре энергетических котла БКЗ-100-39 ГМА, работающих на газообразном и жидком топливе, два водогрейных котла БКЗ-75-39, работающих на жидком топливе [35]. В штате Техас (США) построена ТЭЦ рядом с нефтеперерабатывающим заводом компании Phillips Petroleum Co. Фактически ТЭЦ удовлетворяет все нужды нефтеперерабатывающего производства в паре и электроэнергии, избыток электроэнергии реализуется на открытом рынке. В свою очередь ТЭЦ получают 75 % необходимого им топлива от Phillips Petroleum в виде нефтезаводского газа [12].

Котлоагрегат преобразует химическую энергию топлива в тепловую энергию и передает тепло теплоносителю [84]. В каждом котлоагрегате происходят потери тепловой энергии. При нормальной работе котлоагрегата существуют три вида потерь. Василенко В.В. и Букаров Н.В. выразили в цифрах потери тепла на каждом участке: «С недожогом топлива и уходящими газами (обычно не более 18%), потери энергии через обмуровку котла (не более 4%) и потери с продувкой и на собственные нужды котельной (около 3%)» [20, 52].

Также они описали источники дополнительных потерь тепловой энергии:

- «Если своевременно и качественно не проведена режимная наладка котлоагрегата с инвентаризацией вредных выбросов, то потери с недожогом газа могут увеличиваться на 6-8 %;
- Если подключенная к котлу нагрузка отличается от той, на которую рассчитана горелка. Это несоответствие всегда приводит к снижению теплоотдачи от факелов к поверхностям нагрева и возрастанию на 2-5% потерь с химическим недожогом топлива и уходящими газами;
- Если чистка поверхностей котлоагрегатов производится реже одного раза в 2-3 года, это снижает КПД котла с загрязненными поверхностями на 4-5% за счет увеличения на эту величину потерь с уходящими газами. Кроме того, недостаточная эффективность работы

системы химводоочистки (ХВО) приводит к появлению химических отложений (накипи) на внутренних поверхностях котлоагрегата, значительно снижает эффективность его работы.

- Если котел не оборудован полным комплектом средств контроля и регулирования (паромерами, теплосчетчиками, системами регулирования процесса горения и тепловой нагрузки) или, если средства регулирования котлоагрегата настроены не оптимально, то это в среднем дополнительно снижает его КПД на 5%.
- При нарушении целостности обмуровки котла возникают дополнительные присосы воздуха в топку, что увеличивает потери с недожогом и уходящими газами на 2-5%» [20].

Приведенные выше причины дополнительных потерь тепловой энергии являются скрытыми и трудновывяемыми. Неявные постоянные потери при производстве тепловой энергии достигают 20-25% [20].

## **1.2 Возможные пути повышения энергоэффективности тепловых процессов на НПЗ**

В современном мире увеличение энергоэффективности любого предприятия, в том числе нефтеперерабатывающего завода, считается незаменимым условием конкурентоспособности. Это условие и требует поиска новых путей оптимизации нефтеперерабатывающего производства.

Для повышения энергоэффективности нефтеперерабатывающего завода выделяются четыре приоритетных направления:

- Выполнение грамотной эксплуатации теплотехнического оборудования;
- Оптимизация тепловых потоков с целью уменьшения затрат на внешние энергоносители;
- Использование вторичных энергоресурсов;
- Использование энергоэффективных технологий переработки нефти;

Эксплуатационные меры заключаются в том, что предприятие должно:

- 1) иметь современное оборудование;
- 2) иметь приборы, проходящие поверку в срок;
- 3) проводить внутривоздушный и технический учёт энергии и энергоносителей;
- 4) проводить энергоаудиты как собственными силами, так и сторонними организациями [67].

Из документа [78] следует, что общие правила эксплуатации аппаратов для обеспечения энергоэффективности заключаются в следующем: «подбор оборудования с учетом параметров



работы и свойств сред; интенсификация теплообмена (использование оребренных труб, турбулизирующих вставок, витых труб и др.) с оптимизацией режимов движения; уменьшение образования отложений на поверхностях теплообмена; выбор материалов с учетом их теплопроводности; наружная теплоизоляция аппаратов, а для высокотемпературных процессов (например, в печах) и внутренняя облицовка».

Для нефтеперерабатывающего завода характерна развитая система технологических трубопроводов, сложная трубопроводная обвязка. Для повышения энергоэффективности отдельных установок нефтеперерабатывающего завода целесообразно оптимизировать систему теплообмена между потоками. Такая оптимизация позволяет изменить структуру и параметры тепловых потоков установки, добиваясь наибольшей степени рекуперации энергии и наименьших затрат на внешние энергоносители (вода, воздух, пар).

В документе [78] утверждается: «помимо затрат на поддержание температурных режимов процессов, большая доля энергозатрат в нефтегазоподготовке и переработке связана с необходимостью перемещения технологических потоков в пределах технологических установок и между ними при непрерывном протекании процесса».

Наличие сложной и разветвлённой системы трубопроводов определяет возникновение гидравлических сопротивлений при перекачке потоков. Для обеспечения энергоэффективности при рассмотрении гидродинамических процессов необходимо учитывать: взаимосвязь геометрии трубопроводов, гидравлических сопротивлений и режимов работы; состояние поверхностей трубопроводов и режимов движения потоков; правильный выбор режимов движения с целью уменьшения гидравлических сопротивлений.

С целью уменьшения потерь тепла с хладагентами (воздухом, водой и др.) необходимо проводить анализ охлаждаемых потоков для организации теплообмена с уже существующими холодными потоками, используя инструменты пинч-анализа и системного анализа. Доля использования аппаратов воздушного охлаждения высока на различных стадиях подготовки и переработки нефти, следовательно, поиск путей повышения энергоэффективности в этих устройствах является актуальной задачей. В документе «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в ТЭК» [78] утверждается, что также «резерв энергосбережения заключается в организации работы вентиляторов с учетом температур окружающего воздуха (возможность регулировки частоты вращения) и выбором типа привода».

При проведении высокотемпературных процессов целесообразно использовать вторичные ресурсы. Утилизация тепла заключается в использовании тепла потоков (например, дымовых газов трубчатых печей) для выработки пара в котле-утилизаторе, используемого в технологическом процессе или для иных нужд предприятия. Технологические установки и агрегаты – самые энергоёмкие звенья НПЗ. Главным источником тепловой энергии установки

является печь. На данный момент в нашей стране КПД печей не превышает 68%, но после необходимой реконструкции КПД может повыситься до 92%. Вторым по энергоэффективности источником тепла (пара) является котельный агрегат, в нем следует использовать дымовые газы. Следует отметить резерв энергосбережения при реализации мероприятий данного направления и недостаточный уровень использования тепла дымовых газов [78].

Использование теплофикационной воды для хозяйственных нужд завода является одним из способов повышения энергоэффективности. Этот способ является не новым, но надежным. Тепловая энергия: пара, теплофикационной воды и горячей воды (до 100 Гкал) идет на обогрев открытых насосных, контроллерных, трансформаторных подстанций, столовых, цехов и проч. Теплофикационная вода также применяется для подогрева резервуаров с нефтепродуктами [46].

Нефтегазовые предприятия ставят на первый план поиск новых источников всех видов энергии и внедрение современных технологий, позволяющих уменьшить расходы на производстве. Данная оптимизация позволяет сэкономить миллиарды рублей не только при реконструкции старых, но и при строительстве новых НПЗ [44].

При реконструкции НПЗ 30% затрат идут на объекты обеспечения энергоносителями. Различные источники говорят, что эти затраты более одного млрд. руб. [84].

### **1.3 Методы оценки и повышения энергоэффективности нефтеперерабатывающего завода**

Нефтеперерабатывающий завод является сложной системой с большим количеством установок и разветвленной системой трубопроводов. Для оценки и повышения энергоэффективности установок существуют методики, которые учитывают особенности данной отрасли. В документе «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в ТЭК» описаны следующие распространенные методики: «система Solomon; методология бенчмаркинга энергоэффективности; пинч-анализ; оптимизация гиперструктуры (построение минимальной структуры и построение гипотетической гиперструктуры, допускающей сокращения); стохастическая оптимизация или класс алгоритмов оптимизации, использующих случайность в процессе поиска оптимума» [78].

Метод оптимизации гиперструктуры заключается в построении минимальной структуры и в построении гипотетической гиперструктуры, допускающей сокращения. Метод является сложной математической задачей для проведения оптимизации систем. Данный метод трудный, так как работает с уравнениями нелинейного характера. Следует отметить, что для большого количества задач данный метод выдает не совсем надежные практические решения [78].

В документе «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в ТЭК» дается описание метода стохастической оптимизации: «Метод стохастической оптимизации позволяет генерировать оптимальные решения независимо от начальных приближений, и позволяет исключить попадание в локальные оптимумы, что является его преимуществом. Но реализация метода осуществляется медленнее по сравнению с детерминированными методами» [78].

Для наглядного представления энергетических и материальных потоков определенного процесса или между процессами используется Диаграмма Сэнкея (Sankey diagrams). В документе наилучших технологий ей дали такое определение: «Она представляет собой разновидность потоковой диаграммы, на которой толщина стрелок пропорциональна величине соответствующего потока» [67].

Данный вид диаграмм наглядно отображает данные о потоках. Полезна диаграмма Сэнкея своей универсальностью. С помощью нее можно провести наглядный анализ потоков вещества, потоков энергии, а также финансовых потоков. Анализ простых систем и установок с помощью диаграммы Сэнкея дает хорошую увязку друг с другом всех относительных коэффициентов, но для современных установок она оказывается сложной и запутанной [46].

Для анализа энергоэффективности, относительно нефтеперерабатывающей отрасли, наибольшее распространение получили методика «Solomon» и пинч-анализ.

В документе «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в ТЭК» описывается данный метод следующим образом: «Показатели эффективности «Solomon» оценивают эффективность работы изучаемого предприятия по сравнению со стандартными заводом такой же производительности аналогичной конфигурации и условиями эксплуатации» [78]. Данную методику создала американская компания HSB Solomon Associates LLC [15].

У данной методики есть показатели эффективности (индекс энергоемкости и индекс эффективности неэнергетических затрат), показатели конкурентоспособности (ОРЕХ – денежные операционные затраты и НЕОРЕХ – неэнергетические затраты) [16].

Основные возможности сравнительного анализа «Solomon»:

- сравнительный анализ энергоэффективности данного НПЗ по отношению к аналогичному заводу;
- прогнозирование энергоэффективности на долгосрочный период;
- выражение потенциала энергоэффективности в денежном эквиваленте [78].

Методика сравнительного анализа «Solomon» охватывает более 85% нефтеперерабатывающих заводов мира.

### 1.3.1 Повышение энергоэффективности на основе пинч-анализа

Самый распространённый метод оптимизации тепловых потоков – это метод интеграции (пинч-анализ) [48, 21]. Теоретические основы данного метода изложены в работах зарубежных авторов [97, 101].

В теории пинч-анализа горячие потоки – это потоки, которые отдают свое тепло, а холодные потоки принимают тепло [86]. Внешние энергоносители называются утилитами.

Пинч-анализ позволяет оптимизировать систему с максимальной рекуперацией и наименьшим количеством внешних энергоносителей. Это позволяет уменьшить затраты производства на энергетические ресурсы.

Следующим преимуществом интеграции тепловых потоков является то, что метод позволяет сконструировать теплообменную сеть не убирая начальные теплообменники, а только сгенерировав новые, тем самым уменьшить затраты на реконструкцию.

Методика пинч-анализа позволяет эффективно и быстро провести анализ большого количества тепловых потоков [76].

В последнее время программное обеспечение пинч-анализа набирает обороты. Появилось большое количество программ, которые позволяют создать оптимальную теплообменную сеть. Данные программы созданы по методике пинч-анализа, при этом проектировщик контролирует создание теплообменников с учетом своего опыта [29].

Но одним из основных ограничений пинч-метода является его ориентация на энтальпийный подход к анализу и оптимизации тепловых потоков в рассматриваемой системе.

### 1.3.2 Энтальпийный метод

Самый ранний метод анализа эффективности систем теплообмена считается энтальпийный (балансовый) метод [11]. Он основан на тепловом балансе теплоэнергетических установок и первом законе термодинамики. Балансовый метод не учитывает второй закон термодинамики.

Данный метод включает в себя два подвида:

- 1) Метод производственной равноценности теплоты и работы;
- 2) Физический метод

Основой первого метода является формула к.п.д. проф. В.И. Гриневецкого (1.1):

$$\eta = \frac{W + Q_{\text{отп}}}{BQ_H^P}, \quad (1.1)$$

где  $W$  – электроэнергия, выработанная на клеммах электрогенератора теплофикационной турбины;

$Q_{\text{отп}}$  – тепло, отпущенное потребителю.

Данный показатель часто используется при оценке эффективности теплоэнергетического оборудования и сегодня.

Очевидно, что в числителе дроби (1.1) суммируются неравноценные по качеству слагаемые – электрическая энергия и тепло, не имеющее возможности полностью перейти в другие виды энергии.

Если пренебречь потерями тепла от излучения в окружающую среду и от пропусков рабочего тела через неплотности, а также механическими, электрическими потерями и потерями в котельном агрегате, то для противодавленческой установки значение  $\eta$  по формуле (1.1) всегда будет равно единице независимо от того как идет процесс выработки электрической энергии. Можно весь выработанный в котельной пар дросселировать до нужных потребителю параметров, и все равно  $\eta$  по формуле (1.1) останется равным единице.

Более того, если бы часть электрической энергии была израсходована на работу теплового насоса, приспособленного для обогрева сетевой воды, числитель дроби (1.1) стал бы больше знаменателя, и мы должны были бы признать, что установка с тепловым насосом совершеннее противодавленческой теплофикационной установки, так как ее к.п.д. больше единицы.

Вместе с тем известно, что принципиально отработавший пар не менее выгоден, чем тепловой насос (если не учесть потерь в сетях и тепловом насосе).

Вышеуказанные причины не позволяют уравнению (1.1) быть критерием совершенства рабочего процесса тепловых установок [25].

В середине прошлого века был разработан физический метод. Данный метод отрицает единый показатель расхода топлива ТЭЦ, предлагает учитывать два показателя:

- 1) удельные расходы топлива на производство электрической энергии;
- 2) удельные расходы топлива на производство тепловой энергии.

Однако физический метод также не учитывает качество энергии.

Энтальпийный метод не позволяет в полной мере оценить энергоэффективность теплоэнергетического оборудования, так как не учитывает потенциал (качество) тепловой энергии, не объясняет превращение одних форм энергии в другие [100].

Мартынов А.В. в своей работе [43] утверждает, что для анализа нагревательных установок (котельная, печи) необходимо знать полезный эффект (тепло) и затраты энергии,

которые подаются на установку извне. Определяют целевые коэффициенты ( $K_{ц}$ ) по формуле (1.2):

$$K_{ц} = \frac{\text{Полезный эффект}}{\text{Затраты энергии}}. \quad (1.2)$$

Целевые коэффициенты изменяются в пределах:  $0 \leq K_{ц} \leq \infty$ , таким образом, они не показывают действительную эффективность установок и систем в целом, также их нельзя рассматривать как коэффициент полезного действия. Мартынов А.В. объясняет это следующим: «Это происходит потому, что в них входят различные виды энергии, такие, например, как работа, электроэнергия, тепло и т.д.

Но очевидно, что все виды энергии имеют различную природу и относятся к разным группам, таким как:

- I. Упорядоченный вид энергии (работа и электроэнергия)
- II. Неупорядоченный вид энергии (тепло).

Поэтому нельзя с энергией различных групп, производить различные действия (арифметические, алгебраические и т.д.). Например, нельзя, как это часто делается, делить тепло на работу или наоборот.

Только эксергетический коэффициент полезного действия дает действительную оценку эффективности, т.к. базируется на использовании всех видов энергии, приведённых к одному виду, учитывающему работоспособность энергии (эксергии)» [43].

### *1.3.3 Разновидности эксергетического анализа тепловых установок*

Эксергетический анализ тепловых процессов и систем основан на первом и втором принципах термодинамики. Эксергетический анализ оценивает реальные процессы по степени его отклонения от обратимого процесса.

Имеются две разновидности данной методологии:

- 1) эксергетический метод (метод потоков эксергии);
- 2) энтропийный метод (метод вычитания эксергетических потерь) [25].

Энергию системы можно разделить на два вида:

- энергия, которая совершает работу (эксергия);
- энергия, которая бесполезна и не может совершать работу (анергия).

Эксергия – это максимальная полезная работа, которая может быть совершена при переходе системы в состояние равновесия с окружающей средой [99, 17].

Энтропийный метод связан с работами Клаузиуса Р. Эксергетический метод основан на работах Гюи Ж. и Стодолы А. [16].

Эксергия объекта, который передает теплоту  $Q$  окружающей среде при температуре  $T$ , определяется по формуле (1.3):

$$Ex = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right), \quad (1.3)$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды,

Для того чтобы показать важность понятия эксергии, приведем пример. Существуют две системы:

- Высокопотенциальная система (в подающем трубопроводе теплоноситель имеет температуру  $90^\circ\text{C}$ , после потребителя теплоноситель обладает температурой  $70^\circ\text{C}$ );
- Низкопотенциальная система (в подающем трубопроводе  $60^\circ\text{C}$ , в обратном трубопроводе теплоноситель имеет температуру  $40^\circ\text{C}$ ).

При постоянном массовом расходе теплоносителя и удельной теплоемкости количество теплоты для обеих систем будет одинаково, так как количество теплоты зависит от разности температур. Однако ясно, что высокопотенциальная система обладает большей ценностью, чем низкотемпературная система. Данный факт подтверждает эксергетический анализ [83, 80].

Особенности эксергетического метода анализа [58]:

- Установка условно разделяется на некоторые элементы.
- Определенный элемент установки отделяют от остальных ее элементов условными границами  $kh$  и  $mn$  (рисунок 1.4), через которые данный элемент взаимодействует с соседними элементами.

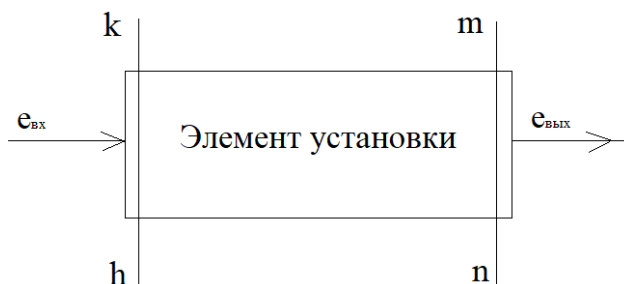


Рисунок 1.4 – Элемент установки, разделенный условными границами

- Для каждого элемента
  - 1) определяются входящие ( $e_{вх}$ ) и выходящие ( $e_{вых}$ ) через эти границы потоки эксергии;
  - 2) рассчитываются потери эксергии по формуле (1.4):

$$D_i = e_{exi} - e_{выxi}, \quad (1.4)$$

где  $D_i$  – потери эксергии рассматриваемого элемента системы;

$e_{exi}$  – входящие потоки эксергии рассматриваемого элемента установки;

$e_{выxi}$  – выходящие потоки эксергии рассматриваемого элемента установки.

3) определяется эксергетический КПД.

Главной функцией эксергетического анализа является эксергетический коэффициент полезного действия, представленный формулой (1.5):

$$\eta_{Ex} = \frac{\sum E_x''}{\sum E_x'}, \quad (1.5)$$

где  $\sum E_x''$  – сумма эксергий рабочих потоков, которые выходят из установки;

$\sum E_x'$  – сумма эксергий всех входящих в систему потоков.

Рабочие потоки эксергии котельного агрегата представлены на рисунке 1.5.

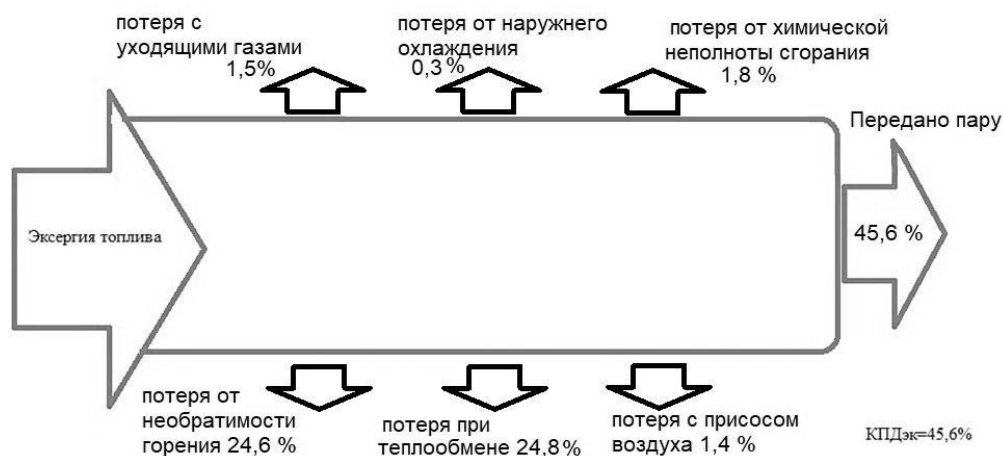


Рисунок 1.5 – Эксергетический баланс котла

В статье «Эксергетический анализ котла посредством пинч-метода» [81] также описывается баланс котельного агрегата: «Сумма коэффициентов от необратимого горения, теплообмена и присосов воздуха составляет 50,8 %, что в тепловом балансе котла даже не учитывается. При тепловом балансе котельного агрегата КПД брутто =94 %, что намного больше, чем показывает эксергетический КПД=45,6 %. Многие современные ученые подтверждают факт разногласий в эксергетическом кпд и кпд брутто» [81, 37].

В результате анализа термодинамических систем эксергетическим методом, было выявлено, что потери энтропии влияют на снижение работоспособности системы. Впоследствии появился энтропийный метод. Он появился в 1951 году. Главной функцией этого метода является формула диссипативной функции (1.6):

$$\sigma = \frac{dS}{dt}, \quad (1.6)$$

где  $S$  – энтропия системы, Дж/(кг·град).

$\tau$  – время, с.

Ромашова О.Ю. описывает следующие особенности энтропийного метода анализа [58]:

- «Используется понятия работы и эксергии теплоты и не используется понятие эксергии потока.



- Каждый элемент рассматривают отдельно от других.
- Для каждого элемента установки рассчитывают эксергетические потери, после чего сумму потерь во всех элементах вычитают из вводимой в установку превратимой энергии». Потери эксергии определяются по формуле (1.7):

$$\sum D_i = \sum E_x' - \sum E_x'', \quad (1.7)$$

где  $\sum D_i$  – суммарная потеря эксергии на каждом элементе системы, Дж.

Потери эксергии в отдельном элементе установки определяются по формуле (1.8):

$$D_i = T_0 \cdot (\sum \Delta S)_i, \quad (1.8)$$

где  $D_i$  – потери эксергии в отдельном элементе установки,

$T_0$  – температура окружающей среды,

$(\sum \Delta S)_i$  – увеличение удельной энтропии, вызванное необратимостью процесса в  $i$ -м элементе.

- «В результате этого получают эксергию на выходе из установки».

Эксергетический коэффициент полезного действия системы уменьшается, когда увеличивается диссипация (увеличивается энтропия). Следовательно, энтропийный метод позволяет определять пути повышения энергоэффективности системы.

Эти два метода очень схожи, однако они отличаются в своих задачах. Эксергетический метод вычисляет эксергию потоков и старается довести эксергию до максимального значения. Энтропийный метод определяет потери эксергии (рост энтальпии) и ведет к минимизации потерь.

Эксергетический метод является понятным и наглядным. Для анализа систем теплообмена в технологии переработки нефти будем использовать именно его, так как данный метод определяет эксергию тепловых потоков. Также эксергетический метод учитывает температуру окружающей среды, ориентирован на реальные условия.

### *1.3.4 Эксергетические балансы теплоэнергетических систем*

Виды и составляющие эксергии вещества и потока энергии представлены в таблице 1.1. В зависимости от наличия и вида материального носителя различают эксергию вещества в объеме и потоке. Однако энергия (теплота и излучение) не связана с массой в количестве, и представляются в виде потока.

Таблица 1.1 – Виды и составляющие эксергии

Вещество	Объем	Термическая
	Поток	Механическая
	Объем	Реакционная
	Поток	Концентрационная
Энергия	Поток	Теплота
		Излучение

Характер взаимодействия технической системы с окружающей средой, источниками и приемниками энергии и вещества в виде объекта (рисунок 1.6), в который входят и выходят эксергетические потоки.

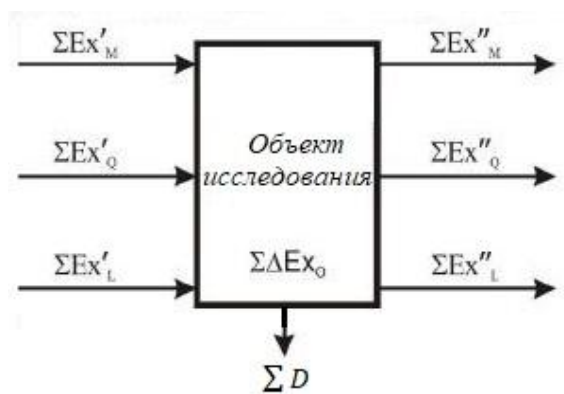


Рисунок 1.6 – Схема объекта эксергетического анализа

В общем виде уравнение эксергетического баланса системы с учетом его составляющих, выражается в формуле (1.9):

$$\sum Ex'_M + \sum Ex'_Q + \sum Ex'_L = \sum Ex''_M + \sum Ex''_Q + \sum Ex''_L + \sum D + \sum \Delta Ex_0, \quad (1.9)$$

где  $\sum Ex'_M$  – суммы источников эксергии масс, Дж;

$\sum Ex'_Q$  – суммы источников эксергии теплоты, Дж;

$\sum Ex'_L$  – суммы источников эксергии потоков, Дж;

$\sum Ex''_M$  – суммы приемников эксергии масс, Дж;

$\sum Ex''_Q$  – суммы приемников эксергии теплоты, Дж;

$\sum Ex''_L$  – суммы приемников эксергии потоков, Дж;

$\sum \Delta Ex_0$  – приращение эксергии внутри технического объекта, Дж. (В стационарных процессах  $\sum \Delta Ex_0 = 0$ );

$\sum D$  – потеря эксергии от необратимости, Дж.

Данное уравнение является развёрнутой формой уравнения (1.7).

Аналогично диаграмме Сенкея в эксергетическом анализе существует диаграмма Грассмана-Шаргута, которая также наглядно показывает потоки эксергии системы. Между ними существуют определенные отличия.

Толщина линий диаграммы Грассмана-Шаргута изменяется. Суммарная линия входящих потоков всегда будет меньше исходящих потоков, потому что существуют потери эксергии. В диаграмме Сенкея ширина стрелок, которые представляют потоки энергии, одинаковая и на входе и на выходе, так как энергетические потоки подчиняются закону сохранения энергии.

Диаграммы Грассмана-Шаргута, в большинстве случаев, включают в себя стрелки, которые изображают потери эксергии. Благодаря этому, диаграмма Сенкея и диаграмма Грассмана-Шаргута становятся схожими [1].

Для сравнения диаграммы Сенкея и диаграммы Грассмана-Шаргута приведен пример построения этих диаграмм для паротурбинной установки (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Схема паротурбинной установки

На схеме паротурбинной установки: КА – котлоагрегат; Т – паровая турбина; Г – электрогенератор; К – конденсатор; ПН – питательный насос; ЭК – экономайзерный участок КА; ИСП – испарительный участок котлоагрегата; ПЕ – перегревательный участок котлоагрегата.

На рисунке 1.8 представлены диаграммы, построенные для паротурбинной установки [37].

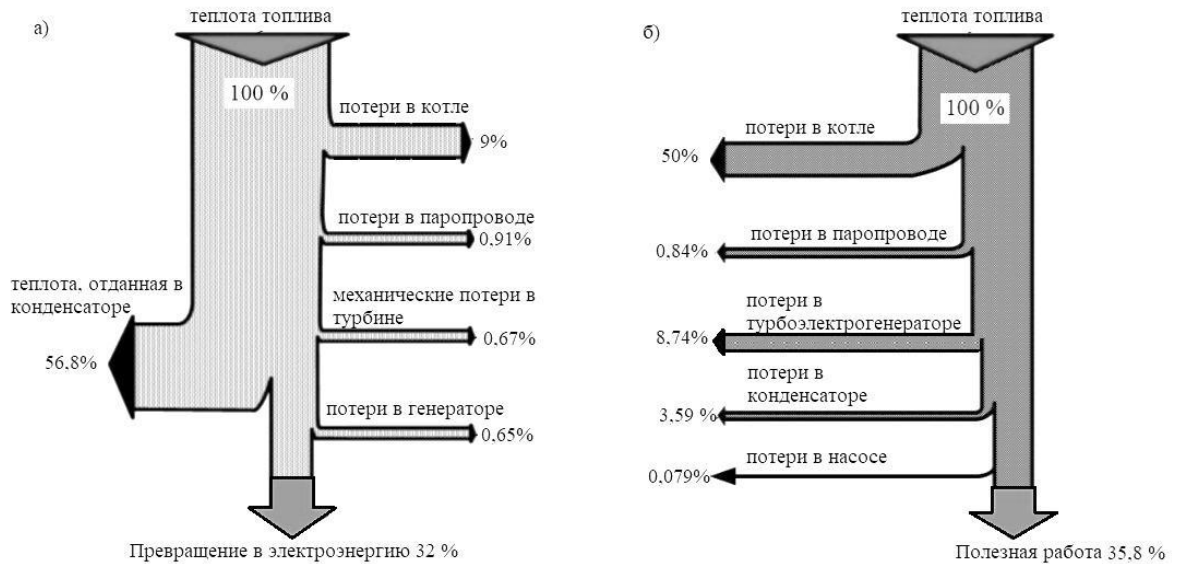


Рисунок 1.8 – Энтальпийная (а) и эксергетическая (б) диаграммы

Проанализировав диаграммы, видно, что величина потерь и номенклатура потерь различна. Эксергетический метод дает более точный и строгий инструмент для анализа эффективности системы [37, 1].

Энтальпийный анализ для некоторых устройств (например, тепловой насос) приводит к некорректным результатам [1]. КПД насоса при таком анализе составляет 300 %. При этом эксергетический метод показывает всего 15% [100, 43, 39].

По Второму началу термодинамики внутреннюю энергию окружающей среды вообще нельзя преобразовать в полезную работу. Энергия, накопленная в окружающей среде, полностью теряет способность к превращению, т.е. становится анергией. Ипатов В.Б. в своей диссертации [31] описывает анергию так: «Система, которая находится в термодинамическом равновесии с окружающей средой, теряет способность совершать полезную работу. Состояние равновесия с окружающей средой в английской литературе называется "dead state" (мертвое состояние) системы». Эксергетический анализ указывает на различную практическую значимость тепловой энергии: потенциал тепла уменьшается, если температура источника приближается к температуре окружающей среды.

При анализе котлоагрегата температура окружающей среды является точкой отсчета потерь тепловой энергии с уходящими газами, так как котлоагрегат представляет собой разомкнутую систему относительно окружающей среды.

Произвести расчет эксергии теплоэнергетического оборудования при стационарных условиях работы не вызывает затруднений. Если изменение энтальпии  $\Delta H$  происходит при постоянной температуре  $T$ , тогда изменение эксергии  $\Delta Ex$  определяется формулой (1.10):

$$\Delta Ex = \Delta H \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right), \quad (1.10)$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды.

Если температура потока не постоянна, то изменение эксергии определяется по формуле (1.11):

$$\Delta Ex = \Delta H \cdot \left(1 - \frac{T_0}{\Delta T_{LM}}\right), \quad (1.11)$$

где  $\Delta T_{LM}$  – среднелогарифмическая разность температур.

Для определения эксергии в условиях меняющихся параметров, необходимо учитывать эти переменные условия.

Так, например, нагреваемая вода (тепловой поток) в экономайзере имеет начальную температуру  $T_1$  и конечную  $T_2$  [81]. Полагая, что количество теплоты находится по формуле (1.12):

$$Q = c_p \cdot m \cdot (T_1 - T_2), \quad (1.12)$$

где  $c_p$  – удельная теплоёмкость потока, Дж/(кг·К);

$m$  – масса потока, кг.

Агапов Д.С. в своей работе [3] дал определение эксергетической функции теплоты следующее: «эксергетическая функция  $Ex$  определяется как произведение теплоты  $Q$  на безразмерную эксергетическую температуру  $\tau$ , представляющую собой КПД цикла Карно» [39]:

$$Ex = Q \cdot \tau = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right). \quad (1.13)$$

В дифференциальном виде уравнение (1.13) записывается следующим образом:

$$d(Ex) = c_p \cdot m \cdot \tau \cdot dT = c_p \cdot m \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot dT. \quad (1.14)$$

Интегрируя данное уравнение (1.14) в интервале температур от  $T_1$  до  $T_2$ , получаем зависимость эксергетической функции  $Ex$  теплоты, запасённой тепловым потоком [39], представленной формулой (1.15):

$$Ex = \int_{T_2}^{T_1} c_p \cdot m \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot dT = c_p \cdot m \cdot [T - T_0 \cdot \ln(T)] \Big|_{T_2}^{T_1} = c_p \cdot m \cdot [T_1 - T_0 \cdot \ln(T_1) - T_2 + T_0 \cdot \ln(T_2)] = c_p \cdot m \cdot [T_1 - T_2 - T_0 \cdot (\ln(T_1) - \ln(T_2))] = c_p \cdot m \cdot \left[T_1 - T_2 - T_0 \cdot \ln \frac{T_1}{T_2}\right], \quad (1.15)$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды.

Формула (1.15) справедлива для непрерывных и стационарных процессов, а также для процессов без фазовых переходов.

Средняя удельная изобарная теплоёмкость вещества определяется формулой (1.16):

$$\bar{c}_p = \frac{c_{pr2} t_2 - c_{pr1} t_1}{t_2 - t_1}, \quad (1.16)$$

где  $C_{pr1}$  - средняя теплоемкость в интервале от нуля до температуры  $t_1$ ;

$C_{pr2}$  - средняя теплоемкость в интервале от нуля до температуры  $t_2$ ;

$t_1$  - начальная температура;

$t_2$  - конечная температура.

Также количество эксергии можно определять при помощи энтальпии и энтропии [37]. Данная формула удобна для расчета потоков при фазовых переходах, удобна для расчетов параметров пара и воды [43, 57]. Полная эксергия потока определяется по формуле (1.17):

$$E_f = m \cdot ((h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0)), \quad (1.17)$$

где  $m$  – массовый расход, кг/с;

$h$  – энтальпия рабочего тела, Дж/кг;

$h_0$  – энтальпия рабочего тела при параметрах окружающей среды, Дж/кг;

$s$  – энтропия рабочего тела, Дж/кгК;

$s_0$  – энтропия рабочего тела при параметрах окружающей среды, Дж/кгК;

$T_0$  – температура окружающей среды, К.

В работе [79] обобщены формулы для определения эксергии топлива, основанные на работах [68, 70, 98]: «Помимо эксергии потоков, в некоторых случаях необходимо знать, сколько эксергии получила система или технологическое устройство, т.е. какова эксергия топлива. Для определения эксергии топлива следует использовать следующие формулы:

Для различных видов топлива эксергия вычисляется по-разному

Для жидкого топлива эксергия вычисляется по формуле (1.18):

$$E_0 = m \cdot 0,975 \cdot Q_B, \quad (1.18)$$

где  $m$  – массовый расход топлива, кг/с,

$Q_B$  – высшая теплотворная способность топлива, Дж/кг.

Для газообразного топлива эксергия вычисляется по формуле (1.19):

$$E_0 = m \cdot 0,95 \cdot Q_B. \quad (1.19)$$

Формула (1.19) справедлива, если в молекуле содержится больше одного атома углерода.

Формула (1.19) не пригодна, если в газах присутствует заметное количество метана, водорода и оксида углерода.

Для твердых топлив эксергия вычисляется по формуле (1.20):

$$E_0 = m \cdot Q_B(1 - W), \quad (1.20)$$

где  $W$  – влагосодержание.

Эксергию излучения находят по формуле (1.21):

$$e_{изл} = \varepsilon \cdot k[3 \cdot (3 \cdot T^4 + T_0^4 - 4 \cdot T_0 \cdot T^3)], \quad (1.21)$$

где  $\epsilon_{\text{излучения}}$  – эксергия, приходящаяся на единицу площади излучающей поверхности, Вт/м<sup>2</sup>;  $\epsilon$  – степень черноты поверхности, Т – температура поверхности, К;  $T_0$  – температура окружающей среды, К;  $k$  – постоянная Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>\*К<sup>4</sup>)».

## 1.4 Выводы по главе 1

Нефтеперерабатывающий завод является сложным теплоэнергетическим объектом, в котором существуют процессы генерации тепла и его использования в производстве. Данные предприятия имеют высокий уровень потерь тепловой энергии и низкую рекуперацию тепла, таким образом, существует потенциал повышения энергоэффективности [8].

Существующие методы оценки и повышения энергоэффективности являются успешными, но не совершенными. Рассмотренные методы не учитывают потенциал тепловой энергии. Методы термодинамического анализа не в полной мере позволяют проводить анализ, учитывая не только количество, но и качество тепловой энергии, что сказывается на использовании энергоресурсов (не обоснованная трата энергетических ресурсов).

Для оценки и повышения энергоэффективности нефтеперерабатывающего предприятия необходим метод, который полноценно может оценивать эффективность теплотехнической системы. В том числе оценивать потенциал энергии, относительно реальных условий. В связи с выше изложенным, возникает необходимость разработки такого метода термодинамического анализа и совершенствования технических систем, который бы сочетал достоинства эксергетического метода и метода структурной и параметрической оптимизации тепловых процессов на основе Пинч-анализа [83].

## **ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ И ОСОБЕННОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ЕГО ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ**

Эксергетический анализ является перспективной основой для проведения оптимизации систем теплообмена, так как данный анализ показывает скрытый резерв экономии топлива [15]. Целью второй главы является экспериментальное определение закономерностей и особенностей использования метода эксергетического анализа для его практического использования при анализе и оптимизации процессов теплообмена в технологиях переработки нефти на НПЗ.

### **2.1 Экспериментальные исследования потоков эксергии в системах учета и распределения тепла**

Экспериментальные исследования потоков эксергии в системах учета проводились в индивидуальном тепловом пункте здания по адресу: г. СПб, ул. Камская. В данном тепловом пункте находятся приборы учета тепловой энергии; трубопровод подачи тепловой энергии и обратный трубопровод тепловой энергии; автоматизированные системы КИП, тепловое оборудование.

В тепловом пункте происходит распределение энергии тепла среди потребителей, регулируются параметры теплоносителя; существует возможность отключения подачи тепла. Принципиальная схема теплового центра представлена на рисунке 2.1.



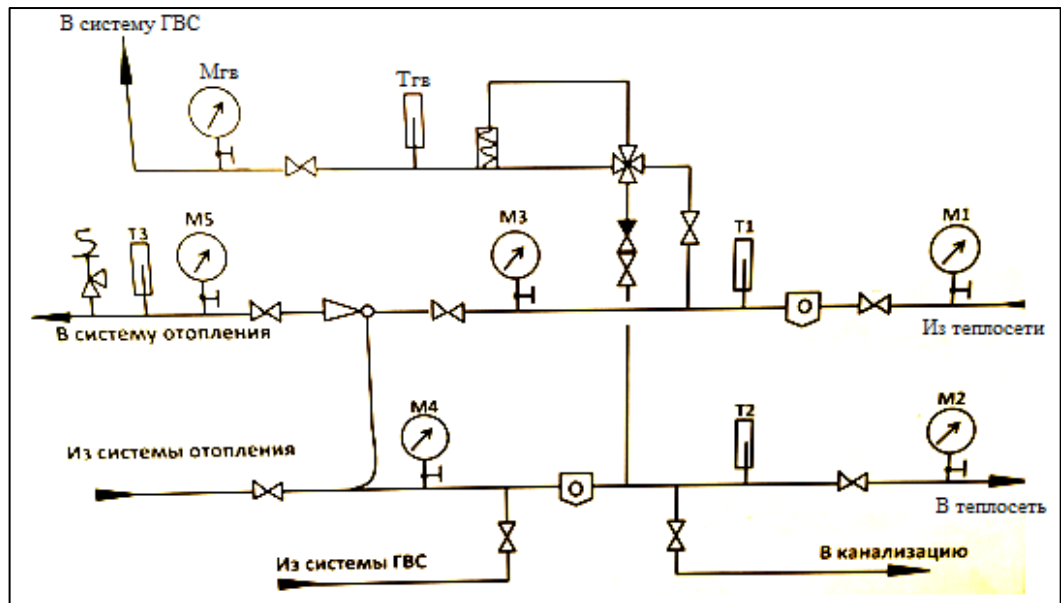


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема теплового центра

Рассматриваемый ИТП оборудован автоматизированной системой учета тепла. Приборы учета имеют все сертификаты и прошли поверку в срок.

Приборы регистрируют:

- 1) время работы;
- 2) количество теплоты, которое пришло из ТЭЦ;
- 3) объемную массу теплоносителя на подающем и обратном трубопроводах;
- 4) температуру теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах каждый час, каждые сутки.

Один из важных приборов системы учета тепла является тепловычислитель, который измеряет электрические сигналы силы постоянного тока, сопротивления и частоты, соответствующих параметрам теплоносителя с последующим расчетом тепловой энергии [61].

Совместно с тепловычислителями применяются:

- преобразователи расхода;
- преобразователи температуры Pt100;
- преобразователи давления.

Тепловычислитель работает в составе теплосчетчика, при этом обслуживает два теплообменных контура. Теплосчетчик представлен на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Показания, выводимые на дисплей

Система учета тепловой энергии включает в себя также адаптер сигналов (рисунок 2.3). Он предназначен для архивных и текущих данных. Адаптер через сеть интернет сообщает в диспетчерскую систему об аварийных ситуациях.



Рисунок 2.3 – Адаптер сигналов АССВ-030

Датчики расхода предназначены для измерения расхода и объема теплоносителя и горячей воды. Расходомер состоит из электромагнитного первичного преобразователя расхода и микропроцессорного измерительного блока (рисунок 2.4).

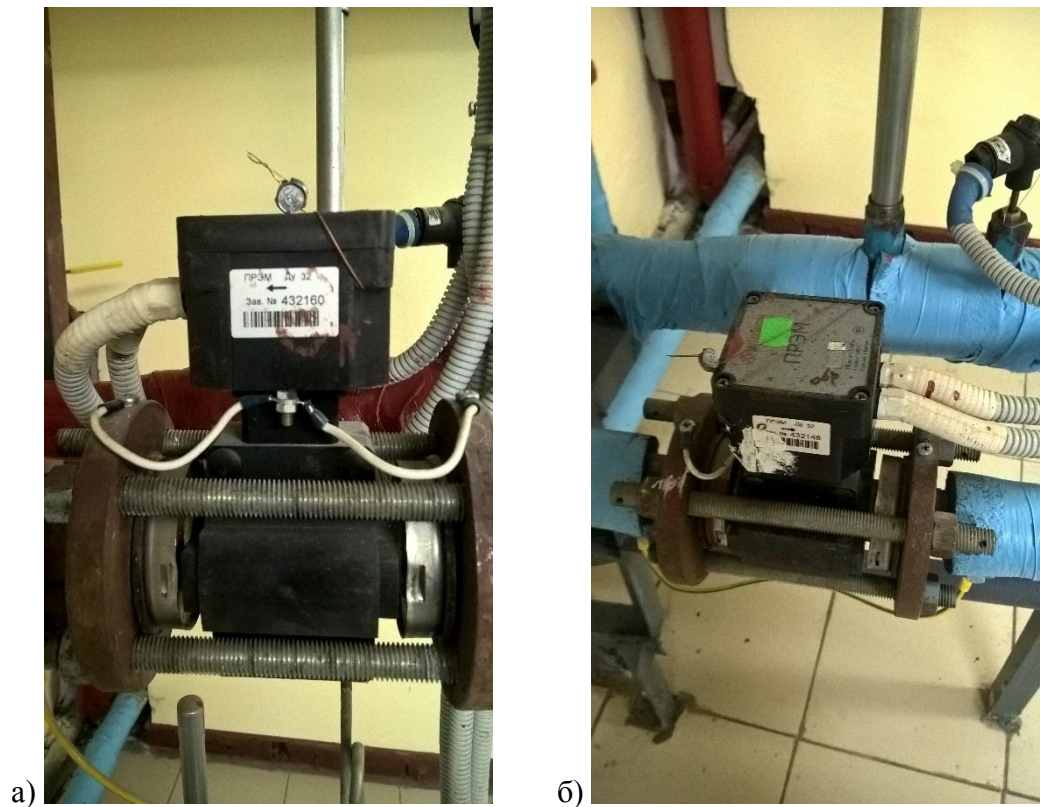


Рисунок 2.4 – Расходомеры электромагнитные ПРЭМ Ду=32 а) в подающем трубопроводе б) в обратном трубопроводе

Термопреобразователи сопротивления необходимы для измерения температуры и разности температур (рисунок 2.5). Они устанавливаются погружением в среду измерения: жидкую, газообразную или сыпучую.

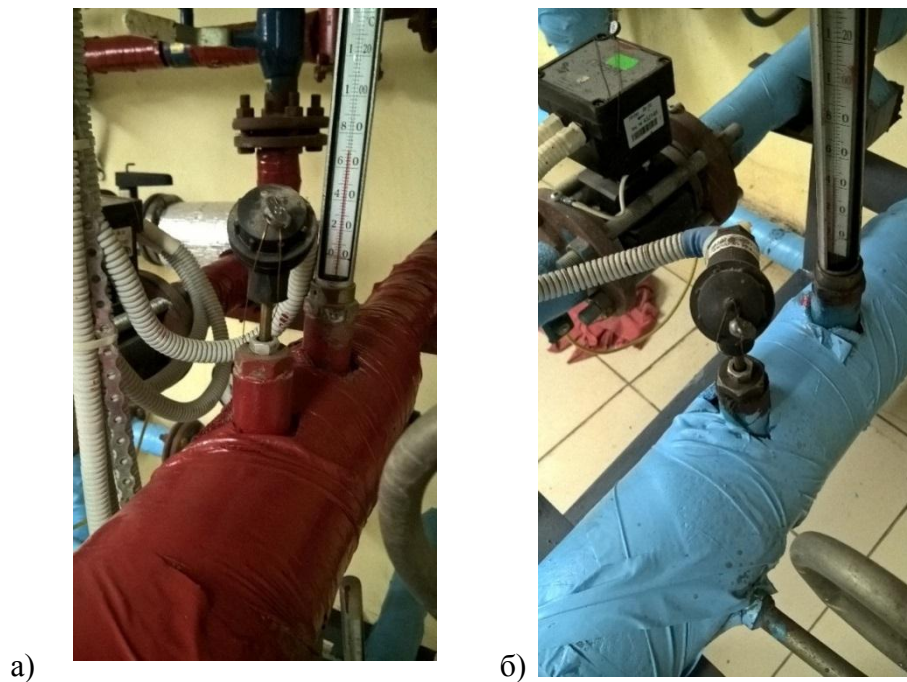


Рисунок 2.5 – Термопреобразователи сопротивления а) в подающем трубопроводе б) в обратном трубопроводе

Первый этап проведения эксергетического анализа систем включает в себя: сбор данных для расчетов, проверка точности и достоверности приборов учета, расчет эксергии.

Произведен сбор ежесуточных показаний по этой тепловой системе за январь и февраль 2017 г.

Данные получаемые от существующей системы учета:

Дата – число, за которое производились измерения.

$T_{вх}$ , °С – температура на подающем трубопроводе.

$T_{вых}$ , °С – температура на обратном трубопроводе.

Расход, т – масса теплоносителя (воды), проходящая по системе за сутки.

$Q$ , Гкал – количество теплоты, которое вычислил теплосчетчик и передал в топливную компанию по интернету.

Проводим экспериментальные исследования на реальном объекте для сравнения энтальпийным и эксергетическим способом. Исходные данные и рассчитанное по ним количество теплоты и эксергии приведены в Приложение А.

Для наглядности ниже продемонстрирован пример расчета количества теплоты 01.01.2017 г. Температура окружающей среды взята стандартная для жилого помещения 20 °С.

Расчет количества теплоты произведен по формуле (1.12). Данные для расчета представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Исходные данные для расчета эксергии и теплоты

Дата	$t_{вх}$ , °С	$t_{вых}$ , °С	$T_{вх}$ , К	$T_{вых}$ , К	Расход, т	Расход, кг	$t_{окр.ср}$ , °С	$T_{окр.ср}$ , К
01.01.2017 г.	73,979	45,087	346,979	318,087	49,413	49413	20	293

$$Q_1 = 49413 \cdot 4,196(346,979 - 318,087) = 5990379 \text{ кДж} = 5990,4 \text{ МДж.}$$

Эксергия вычисляется по формуле (1.12):

$$\begin{aligned} E_{x_1} &= 49413 \cdot 4,196 \cdot \left( 346,979 - 318,087 - 293 \cdot \ln \frac{346,979}{318,087} \right) = \\ &= 708838,6998 \text{ кДж} = 708,8 \text{ МДж.} \end{aligned}$$

А также переведем количество теплоты и эксергию в Гкал.

$$Q_1 = Q \cdot 0,000000239 = 5990379 \text{ кДж} \cdot 0,000000239 = 1,431701 \text{ Гкал.}$$

$$E_{x_1} = E \cdot 0,000000239 = 708838,6998 \text{ кДж} \cdot 0,000000239 = 0,1694 \text{ Гкал.}$$

Необходимо отметить, что расчетное количество теплоты совпадает с данными, которые передал теплосчетчик СПТ943 тепловой компании за 01.01.2017 г. - 1,431701 Гкал.

График количества теплоты и эксергии (МДж) за январь-февраль 2017 г приведен на рисунке 2.6.

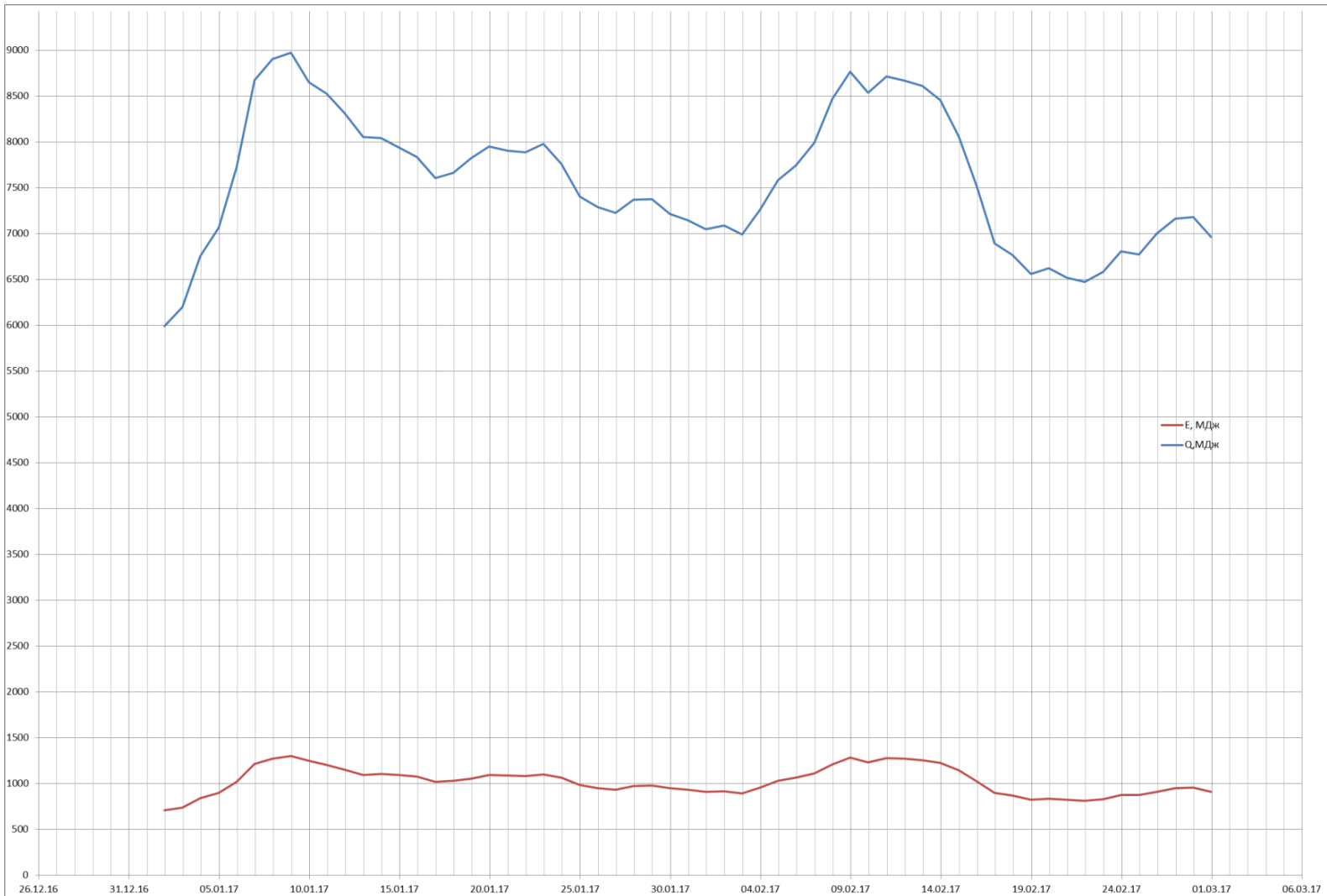


Рисунок 2.6 – График количества теплоты и эксергии (MДж) за январь-февраль 2017 г.

Из данного исследования на реальном объекте можно сделать выводы:

- 1) Из графика видно, что количество теплоты с течением времени имеет скачкообразный характер, эксергия, в свою очередь, имеет меньшие амплитуды.
- 2) Данный объект исследования обладает комбинированным способом регулирования, следовательно, изменяется количество и качество тепловой энергии. Для полного исследования потоков эксергии следует воспользоваться качественным способом регулирования.
- 3) Для того чтобы провести эксергетический анализ систем, необходимо собрать данные для расчетов, проверить точность и достоверность приборов учета, произвести расчет эксергии. Затем только возможно проводить анализ системы. Данный этап занимает много времени, также не исключен человеческий фактор. В ходе исследования систем учета были использованы приборы учета, непосредственно измеряющие температуры, расходы. Эксергия определялась расчетным путем. Существует необходимость в создании устройства для измерения эксергии рабочей среды, что позволит выводить количество эксергии сразу на дисплей и компьютер, что ускорит эксергетический анализ.

## **2.2 Алгоритм и техническая реализация устройства для измерения эксергии рабочей среды**

Устройство относится к области теплоэнергетики, а именно к устройствам измерения эксергии тепловой энергии. Устройство может быть использовано в контрольно-измерительных приборах в нефтеперерабатывающей промышленности, в химико-технологических системах, в системах теплоснабжения (Приложение Б).

### *2.2.1 Устройство для измерения эксергии рабочей среды*

Устройство для измерения эксергии рабочей среды обладает высокой точностью измерения, не зависящее от однородности среды, что позволяет оценивать систему теплоснабжения количественным и качественным методом.

Принцип действия устройства для измерения эксергии рабочей среды поясняется на рисунках 2.7 и 2.8.

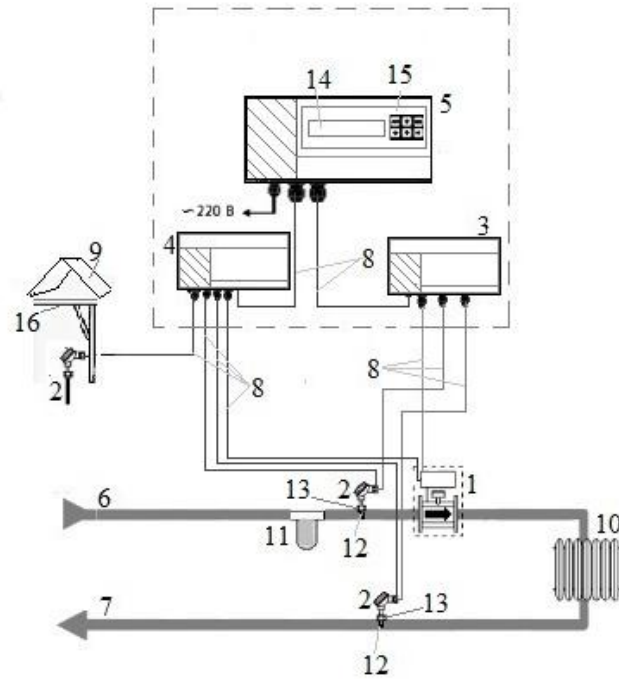


Рисунок 2.7 – Общая схема устройства

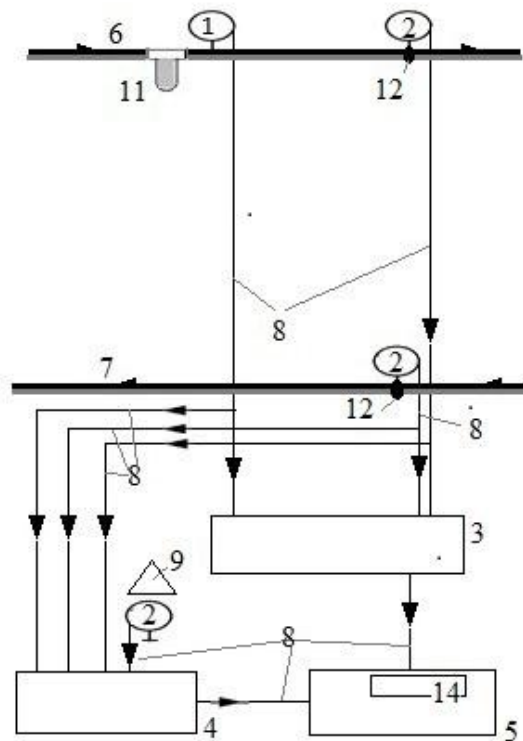


Рисунок 2.8 – Принципиальная схема устройства

- 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.

Устройство для измерения эксергии рабочей среды состоит из электромагнитного первичного преобразователя расхода 1, у которого электроды расположены в среднем сечении трубы, диаметрально противоположно друг другу и изолированы от трубы. Электромагнитный первичный преобразователь расхода 1 через резьбовое соединение подключается через монтажные штуцеры, привариваемые в разрыв подающего трубопровода 6. Термопреобразователи сопротивления 2 на подающем трубопроводе 6 и обратном трубопроводе 7 выполнены как погружаемые. Термопреобразователи сопротивления 2 состоят из погружаемого штока, на конце которого закреплен термочувствительный элемент, резьбового соединения и экранированного кабеля в оболочке для подсоединения к электронному блоку. Термопреобразователи сопротивления 2 установлены резьбовым соединением через монтажные штуцеры в защитные гильзы 12, которые устанавливаются в бобышки 13 резьбовым соединением, бобышки 13 приварены в разрыв подающего трубопровода 6 и в разрыв обратного трубопровода 7. Защитный козырек 9 выполнен в форме треугольника, из оцинкованной стали и пластика. Защитный козырек 9 жестко закреплен в верхней части кронштейна 16, который установлен на вертикальную поверхность. На кронштейне 16 жестко закреплен термопреобразователь сопротивления 2. Электромагнитный первичный преобразователь расхода 1 соединяется электрическими кабелями 8 с



вычислительными устройствами: тепловычислитель 3, вычислитель эксергии 4 и устройство учета 5. На передней панели устройства учета размещены дисплей 14 и кнопки управления 15. Перед электромагнитным первичным преобразователем расхода 1 установлен дополнительный фильтр 11 грубой очистки, выполненный в виде колбы с картриджем из полиэстера или скрученной полипропиленовой нити.

Устройство работает следующим образом (рисунок 2.9). Два термопреобразователя сопротивления 2 измеряют температуру теплоносителя в подающем трубопроводе 6, в обратном трубопроводе 7 и передают информацию тепловычислителю 3. Также термопреобразователи сопротивления 2 измеряют температуру теплоносителя в подающем трубопроводе 6, в обратном трубопроводе 7, измеряют температуру окружающей среды и передают информацию вычислителю эксергии 4. Для защиты термопреобразователей сопротивления от повышенного давления и скорости теплоносителя в трубопроводах они монтируются в специальных защитных гильзах 12. С электромагнитного первичного преобразователя расхода 1 сигнал, являющийся функцией объемного расхода теплоносителя, по электрическому кабелю 8 идет на тепловычислитель 3 и вычислитель эксергии 4. Тепловычислитель 3 определяет количество теплоты, а вычислитель эксергии 4, на основании полученных данных, определяет эксергию потока. Устройство учета 5, первый вход которого соединен с выходом вычислителя эксергии, а второй вход соединен с выходом тепловычислителя, выводит информацию на дисплей 14, где можно сравнить количество теплоты и эксергию. Фильтр 11 устанавливается на магистраль трубопровода. После исчерпания ресурса картриджа производят его замену. Промывке и повторному использованию съемный элемент не подлежит. Защитный козырек 9 препятствует попаданию влаги и прямых солнечных лучей на термопреобразователь сопротивления 2, который измеряет температуру воздуха.

Устройство для измерения эксергии рабочей среды позволяет измерять эксергию и количество теплоты. Эксергетический анализ работы теплоэнергетических и технологических установок учитывает не только количественные, но и качественные характеристики энергоресурсов в различных элементах установок [79].

Аппаратная реализация предлагаемого устройства может быть осуществлена с помощью существующих электротехнических, электронных и микропроцессорных устройств при надлежащем выборе и настройке соответствующих параметров [95]. Устройство получило серебряную медаль на международной выставке «Архимед 2020», диплом представлен в

Приложение В. Устройство для измерения эксергии вошло в ТОП-100 лучших изобретений России.

### 2.2.2 Программа для вычисления эксергии рабочей среды

Программа предназначена для расчета эксергии потока рабочей среды при помощи математической модели с учетом удельной теплоемкости рабочей среды, массового расхода рабочей среды, начальной температуры рабочей среды, конечной температуры рабочей среды и температуры окружающей среды. Основной идеей программы является автоматическое вычисление эксергии, что позволяет определить потенциал тепловой энергии в зависимости от окружающей среды.

В программе учитываются такие факторы, как: удельная теплоемкость, массовый расход, начальная температура, конечная температура, температура окружающей среды.

Характеристики программы для ЭВМ:

Тип ЭВМ: Windows 7 и выше

Язык: C#

ОС: WindowsXP/Vista/7/8/10

Объем программы: 24,5 КБ

**Рекомендации для запуска (проверки) программы для вычисления эксергии рабочей среды:**

- 1) В данной программе можно выбрать рабочую среду: вода, нефть, пар, уходящие газы, мазут. После выбора среды автоматически будет введена удельная теплоемкость. Если необходима другая рабочая среда, то можно нажать: ручной ввод. Далее удельную теплоемкость вбиваем вручную. Интерфейс программы для вычисления эксергии представлен на рисунке 2.9.

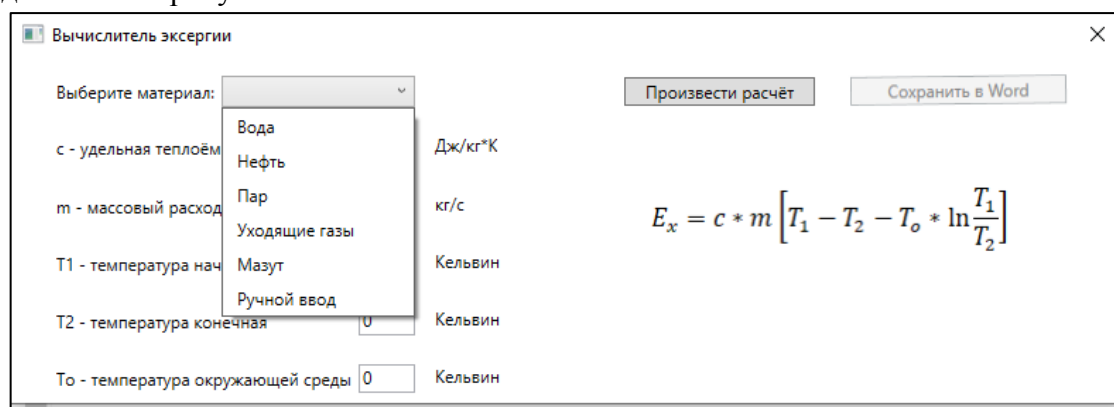


Рисунок 2.9 – Интерфейс программы для вычисления эксергии: выбор материала

- 2) Вводим остальные данные по рабочей среде: массовый расход, температура начальная, температура конечная, температура окружающей среды.

- 3) Нажимаем кнопку: «Произвести расчет». Рассчитанная эксергия высветится в правом нижнем углу. Интерфейс программы для вычисления эксергии представлен на рисунке 2.10.

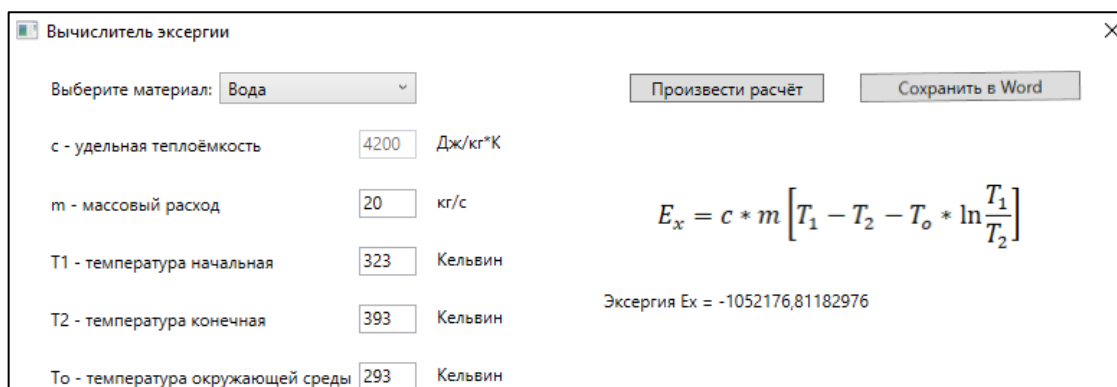


Рисунок 2.10 – Интерфейс программы для вычисления эксергии: ввод данных и расчет эксергии

- 4) При необходимости расчет можно сохранить в Word. Где будут все данные о потоке и эксергия. Пример отчета представлен на рисунке 2.11.

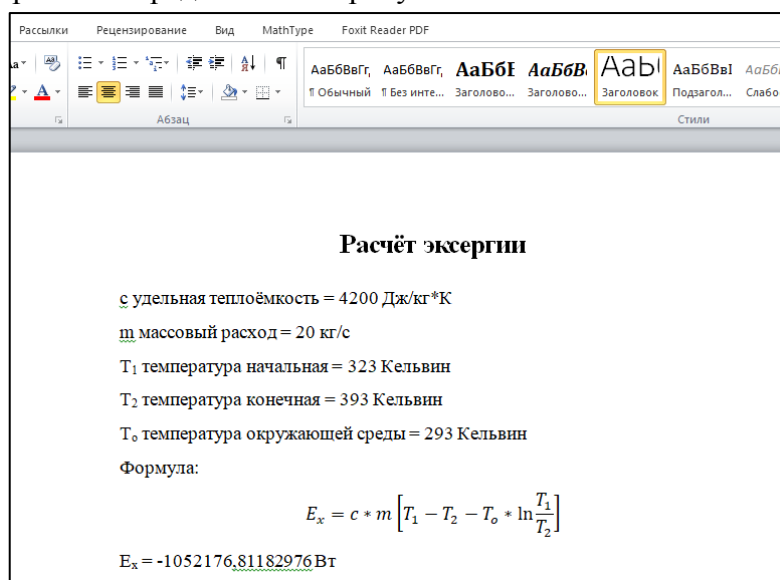


Рисунок 2.11 – Создание программой отчета по проведению расчета эксергии в Microsoft Word

Преимущества использования программы и устройства для измерения эксергии опубликованы в статье [79]: «Программа позволяет автоматизировать вычисление эксергии и сократить сроки проведения эксергетического анализа, а также повысить ее качество и достоверность, исключив в расчетах человеческий фактор».

Программа может быть использована при исследовании тепловых процессов в нефтеперерабатывающей промышленности, в химико-технологических системах, в системах теплоснабжения, а также в учебном процессе кафедры Теплотехники и Теплоэнергетики.

### 2.3 Экспериментальные исследования потоков эксергии при качественном регулировании

В параграфе 2.1. было выявлено, что для проведения исследования потоков эксергии необходимо качественное регулирование. Для проведения экспериментов создана установка, которая моделирует систему отопления с качественным регулированием, к которой подключено устройство для измерения эксергии.

Принципиальная схема установки изображена на рисунке 2.12.

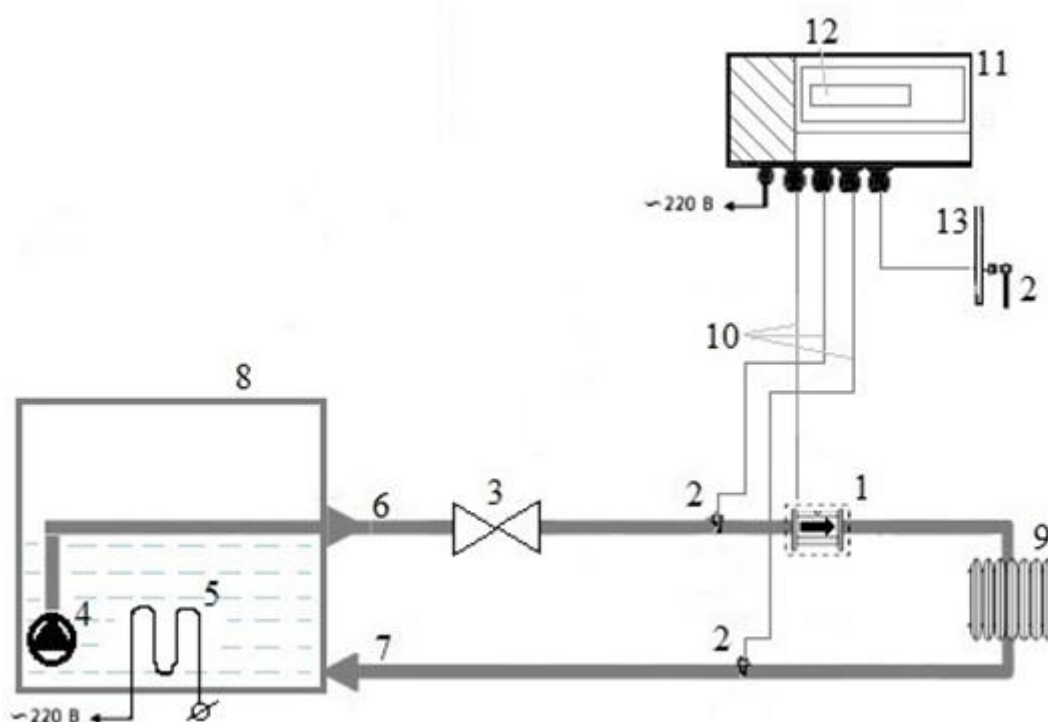


Рисунок 2.12 – Принципиальная схема устройства

- 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.

В баке 8 нагревается вода за счет нагревательного элемента 5. Погружной насос 4 подает из бака горячую воду в подающий трубопровод 6. На подающем трубопроводе вмонтирован датчик расхода воды 1 через резьбовое соединение по направлению движения теплоносителя. На подающем трубопроводе измеряется температура теплоносителя с помощью датчика температуры 2. После потребителя 9 теплоноситель возвращается по обратному трубопроводу 7 в бак. На обратном трубопроводе установлен датчик температуры 2. Также для измерения эксергии установлен датчик температуры 2 на стенд 13, датчик измеряет температуру окружающей среды. К контроллеру 11 подаются сигналы с четырех датчиков через электрические кабели 10. Контроллер выводит данные датчиков, количество теплоты, количество эксергии на дисплей 12. Контроллер соединен с дисплеем посредством контактов, сам контроллер жестко закреплен к стенду 13 для удобства проведения эксперимента. В установке теплоносителем является вода.

Действительная модель установки представлена на рисунке 2.13.

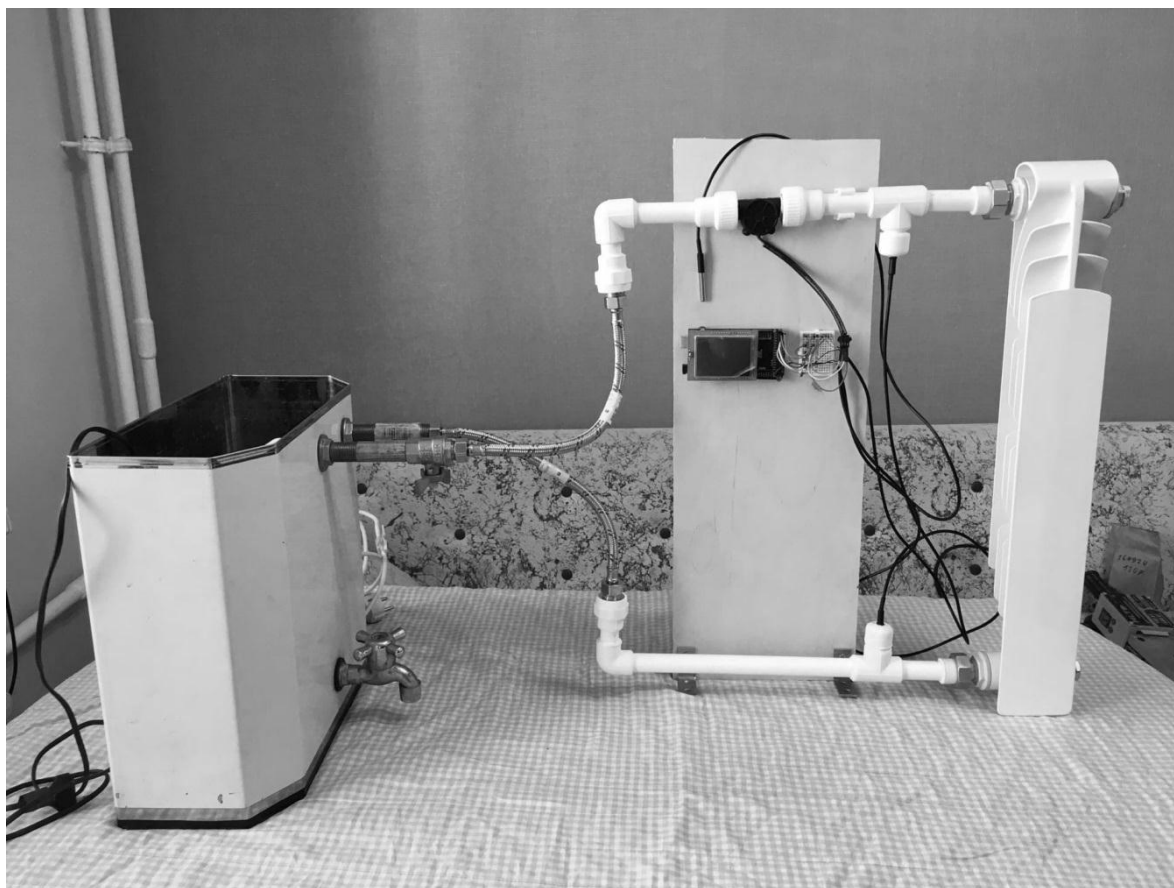


Рисунок 2.13 – Система отопления и подключенное к ней устройство для измерения эксергии

Ниже представлены характеристики элементов устройства для измерения эксергии.

***Датчик расхода воды G1/2 1-30 л/мин***

Датчик расхода воды состоит из пластикового корпуса, водяного ротора и датчика Холла. Датчик Холла выдает импульс при каждом вращении лопастей. Датчик Холла герметично отделен от воды и лопастей, что защищает от протечек и неисправностей [60].

Характеристики:

- Рабочее напряжение: 5 - 18 В;
- Потребляемый ток: до 15 мА (при  $V_{cc} = 5$  В);
- Измеряемый диапазон расхода воды: 1 - 30 л/мин;
- Погрешность измерений:  $\pm 3\%$ ;
- Рабочее давление: до 1,75 МПа;
- Рабочая температура: 0 - 80 °С;
- Температура жидкости: не выше 120 °С;
- Влажность воздуха: 35 - 90 %;
- Размер патрубка:  $\varnothing 20$  мм (внешний),  $\varnothing 10$  мм (внутренний);
- Размер трубной резьбы: G1/2" (1/2 трубного дюйма) (внешний  $\varnothing 20,955$  мм / внутренний  $\varnothing 18,631$  мм / шаг 1,814 мм);
- Габариты: 65x36x36 мм;
- Вес: 43 г.

Применение: водонагреватели, автомат для воды, устройство для измерения расхода воды.

***Датчик температуры DS18B20 в водонепроницаемом корпусе***

DS18B20 – это цифровой температурный датчик, обладающий множеством полезных функций. DS18B20 — это целый микроконтроллер, который может хранить значение измерений, сигнализировать о выходе температуры за установленные границы, менять точность измерений, способ взаимодействия с контроллером и т.д. Корпус датчика в водонепроницаемом исполнении [90].

Характеристики:

- Длина кабеля: 100 мм;
- Водонепроницаемый корпус из нержавеющей стали 6 x 50 мм;
- Напряжение питания: 3- 5,5 В;
- Диапазон измерения: от  $-55$  до  $+125$  °С;
- Погрешность измерения:  $\pm 0.5$  °С;

### ***Дисплей TFT LCD***

Дисплей предназначен для работы совместно с контроллером Arduino Mega 2560.

Характеристики:

- Контроллер ILI9481;
- Разрешение 480x320;
- Диагональ 3,2";
- Встроенный преобразователь уровней;
- Разъем для SD Flash [106].

### ***Arduino Mega 2560 R3***

Микроконтроллер *Arduino* Mega 2560 подключают к компьютеру через USB провод и проводят программирование. Микроконтроллер передает данные показаний на компьютер, выводит данные на дисплей.

Характеристики:

- Рабочее напряжение: 5 В;
- Входное напряжение (рекомендуемое): 7-12 В;
- Входное напряжение (предельное): 6-20 В;
- Постоянный ток через вход/выход: 40 мА;
- Постоянный ток для вывода: 50 мА;
- Флеш-память: 256 кВ ;
- Энергонезависимая память: 4 кВ [47, 30].

Для работы установки необходимо подключить к сети: насос, нагревательный элемент, контроллер. Установка работает при постоянном расходе. Контроллер записывает показания каждые 3 секунды и передает компьютеру данные системы, количество теплоты и количество эксергии. Устройство для измерения эксергии также выводит данные на дисплей (рисунок 2.14).



Рисунок 2.14 – Дисплей и показания устройства

Температура окружающей среды равна 11,63 °С.

Теплоноситель в системе нагревался с 14,13 °С до 56,88°С.

Данные показаний прибора представлены в Приложение Г.

Для анализа результатов были выделены периоды, когда разность между температурами на входе и на выходе постоянна.

Устройство для измерения эксергии выдает значения количества теплоты и эксергии в единицах измерениях Дж/сек. Период интервала 3 сек. Переведем количество теплоты и эксергии в Дж, для этого воспользуемся формулой (2.1) и (2.2):

$$Q_0 = Q \cdot t, \quad (2.1)$$

$$E_0 = E \cdot t, \quad (2.2)$$

где  $Q$ - количество теплоты Дж/сек;

$E$  – эксергия теплового потока Дж/сек;

$Q_0$ -количество теплоты, Дж;

$E_0$ -количество эксергии, Дж;

$t$ - время периода, сек.

Данные периоды представлены в таблице 2.2.



Таблица 2.2.– Данные эксперимента, когда разность температур постоянна

Массовый расход, кг/сек	Температура окружающей среды, К	Температура на входе, К	Температура на выходе, К	Количество теплоты, Дж	Эксергия, Дж	Электричество, затрачиваемое на теплоту, Вт	Электричество, затраченное на эксергию, Вт	Массовый расход топлива, затрачиваемого на теплоту, мг	Массовый расход топлива, затрачиваемого на эксергию, мг
0,03	284,69	310,94	308,19	1155	92,79	385	30,93	39,4	3,2
0,03	284,63	311,06	308,31	1155	93,48	385	31,16	39,4	3,2
0,03	284,63	311,75	309	1155	95,82	385	31,94	39,4	3,3
0,03	284,69	311,88	309,13	1155	96	385	32	39,4	3,3
0,03	284,69	312,06	309,31	1155	96,66	385	32,22	39,4	3,3
0,03	284,63	312,38	309,63	1155	97,95	385	32,65	39,4	3,3
0,03	284,69	312,5	309,75	1155	98,13	385	32,71	39,4	3,3
0,03	284,69	312,63	309,88	1155	98,55	385	32,85	39,4	3,4
0,03	284,69	312,81	310,06	1155	99,21	385	33,07	39,4	3,4
0,03	284,69	313,13	310,38	1155	100,26	385	33,42	39,4	3,4
0,03	284,69	313,25	310,5	1155	100,68	385	33,56	39,4	3,4

Продолжение таблицы 2.2

0,03	284,69	313,31	310,56	1155	100,89	385	33,63	39,4	3,4
0,03	284,69	313,44	310,69	1155	101,55	385	33,85	39,4	3,5
0,03	284,69	313,56	310,81	1155	101,73	385	33,91	39,4	3,5
0,03	284,69	315	312,25	1155	106,56	385	35,52	39,4	3,6
0,03	284,63	315,19	312,44	1155	107,4	385	35,8	39,4	3,7
0,03	284,69	315,31	312,56	1155	107,61	385	35,87	39,4	3,7
0,03	284,69	315,44	312,69	1155	108,03	385	36,01	39,4	3,7
0,03	284,69	315,81	313,06	1155	109,26	385	36,42	39,4	3,7
0,03	284,75	316	313,25	1155	109,68	385	36,56	39,4	3,7
0,03	284,75	316,19	313,44	1155	110,28	385	36,76	39,4	3,8
0,03	284,75	316,44	313,69	1155	111,12	385	37,04	39,4	3,8
0,03	284,81	316,63	313,88	1155	111,51	385	37,17	39,4	3,8
0,03	284,75	316,88	314,13	1155	112,56	385	37,52	39,4	3,8
0,03	284,75	316,94	314,19	1155	112,77	385	37,59	39,4	3,8

*Продолжение таблицы 2.2*

0,03	284,69	317,25	314,5	1155	114,03	385	38,01	39,4	3,9
0,03	284,69	317,56	314,81	1155	115,08	385	38,36	39,4	3,9
0,03	284,69	318,56	315,81	1155	118,35	385	39,45	39,4	4,0
0,03	284,75	318,88	316,13	1155	119,13	385	39,71	39,4	4,1

На рисунке 2.15 представлена зависимость эксергии и количества теплоты от температуры на входе.

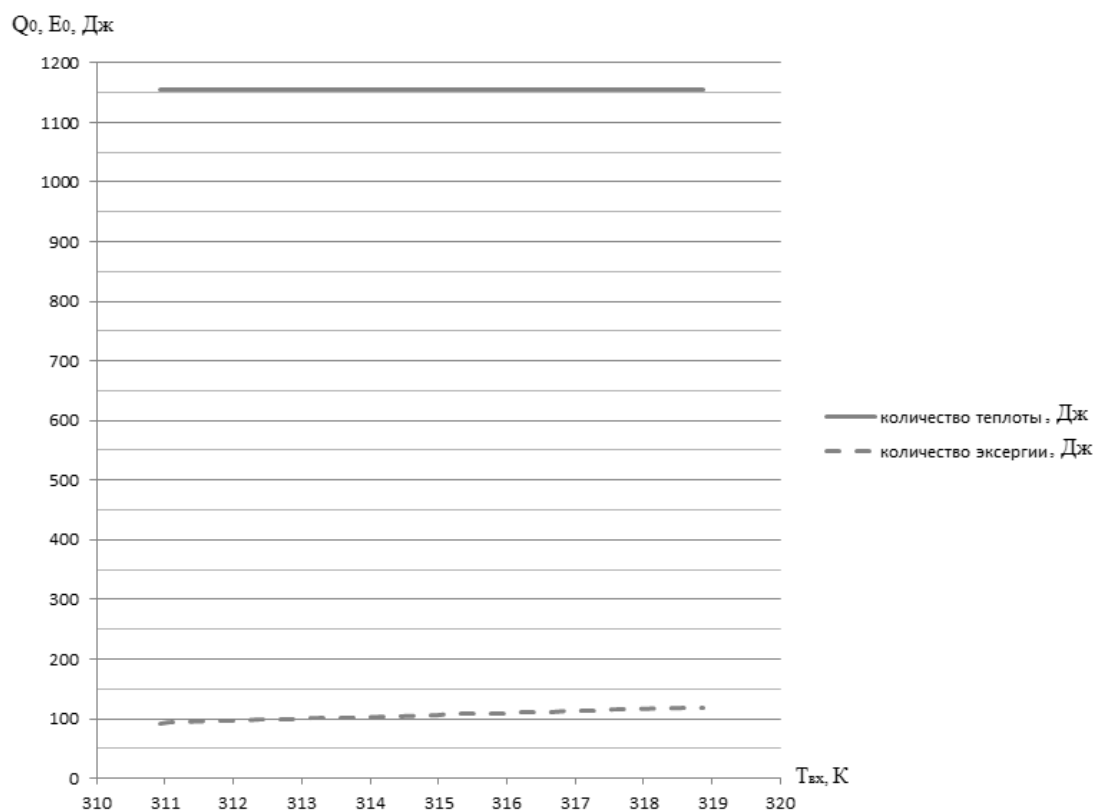


Рисунок 2.15 – Зависимость эксергии и количества теплоты от температуры на входе  
Проведя анализ результатов, можно сделать следующие выводы:

- Количество теплоты остается постоянным с течением времени, хотя температура на входе растет. Это говорит о том, что энтальпийный метод зависит от разности температур, не учитывая потенциал тепла.
- Эксергия увеличивается с возрастанием температуры на входе.

В эксперименте теплоноситель нагревается тэном мощностью 1,25 кВт. Рассчитаем количество электричества, которое затрачивается на нагрев воды.

Для расчета мощности электричества через теплоту воспользуемся формулой (2.3.)

$$W_q = \frac{Q_0}{t}, \quad (2.3)$$

где  $W$  - мощность электричества;

$t$  - время периода.

Для расчета мощности электричества через эксергию воспользуемся формулой (2.4):

$$W_e = \frac{E_0}{t}. \quad (2.4)$$

Затрачиваемое электричество рассчитано двумя способами. Зависимость затрачиваемого электричества на нагрев теплоносителя от входной температуры теплоносителя представлена на рисунке 2.16.

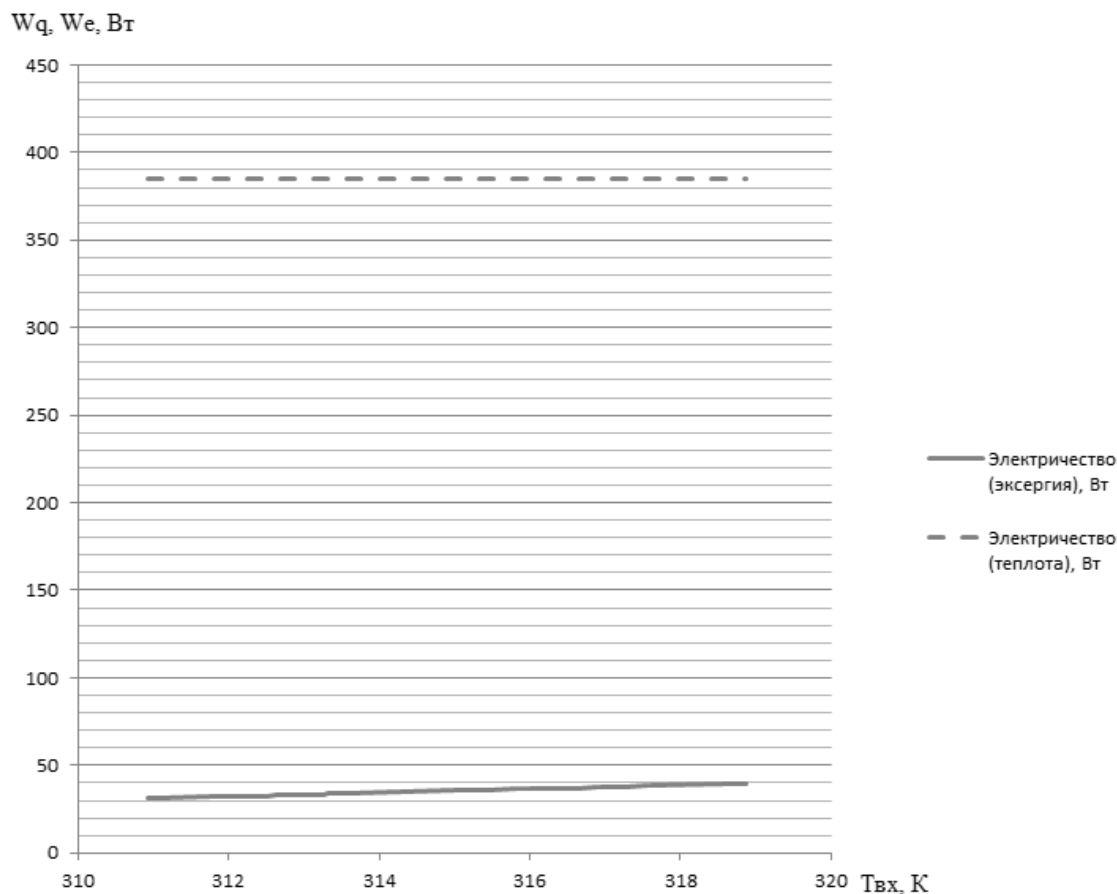


Рисунок 2.16 – Зависимость затрачиваемого электричества на нагрев от входной температуры теплоносителя

В данном эксперименте энтальпийный метод показал, что количество теплоты остается постоянным при одинаковой разности температур, следовательно, и количество затрачиваемого электричества остается постоянным. Энтальпийный метод не показывает изменение расхода электричества при повышении потенциала теплоносителя.

Эксергетический метод показал, что расход электричества увеличивается с возрастанием начальной температуры.

Для наглядности эксперимента также рассчитаем расход удельного топлива затрачиваемого для получения теплоты и получения эксергии.

Используя формулу (2.5) и (2.6), определяем количество топлива для каждого расчетного периода, когда разность температур постоянна:

$$m_q = \frac{Q_0}{Q_{y.t.}}, \quad (2.5)$$

$$m_e = \frac{E_0}{Q_{y.t.}}, \quad (2.6)$$

где  $Q_{y.t.}$  - теплота сгорания условного топлива.

Расход топлива рассчитан двумя способами. Зависимость затрачиваемого удельного топлива от входной температуры теплоносителя представлена на рисунке 2.17.

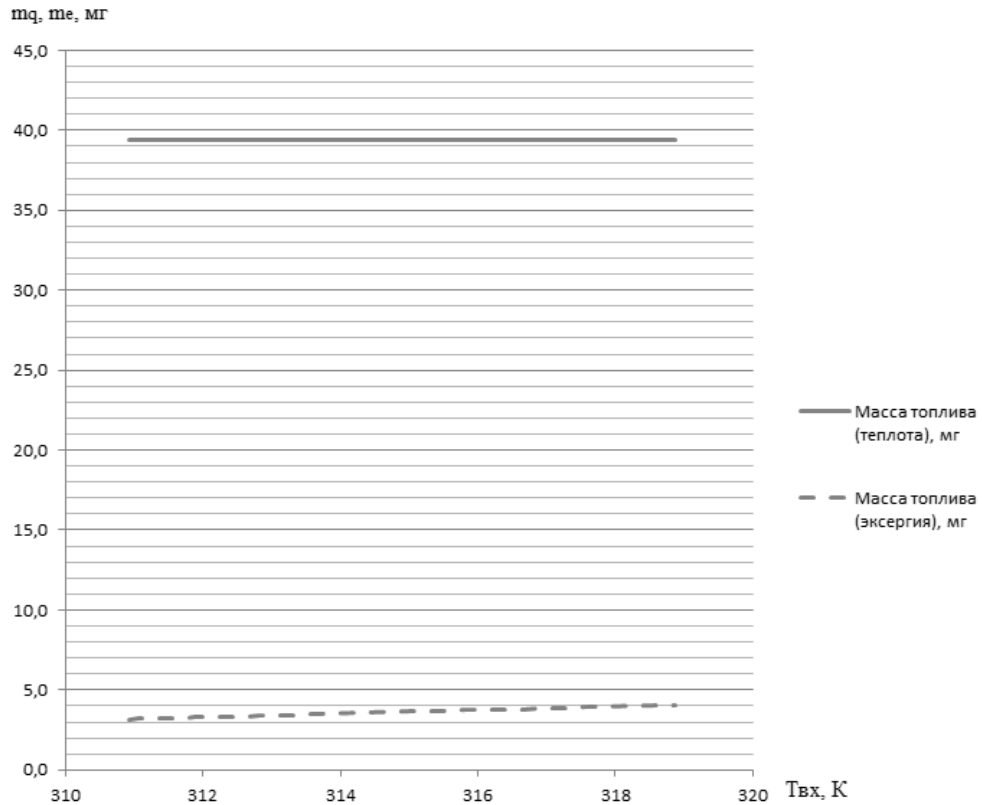


Рисунок 2.17 – Зависимость затрачиваемого удельного топлива от входной температуры теплоносителя

При одинаковой разности температур на входе и на выходе энтальпийный метод показывает, что количество топлива, расходуемого на нагрев рабочего тела, 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.

## 2.4 Выводы по главе 2

Проведены экспериментальные исследования потоков эксергии на реальном объекте - тепловом пункте. Результаты показали, что эксергия имеет интегральный характер с течением времени, а количество теплоты с течением времени имеет большие амплитуды.

Рассмотренный индивидуальный тепловой пункт обладает комбинированным способом регулирования, что не позволяет в полной мере выявить особенности и закономерности эксергетического анализа процессов учета тепла. Для проведения более полного анализа потоков эксергии была создана экспериментальная установка с качественным способом регулирования и приборным измерением эксергии.

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.

В ходе проведения экспериментов на установке было выявлено:

При одинаковой разности температур на входе и на выходе энтальпийный метод показывает, что количество топлива, расходуемого на нагрев рабочего тела, 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.

Таким образом, эксергетический метод является перспективным для определения количества топлива с точки зрения экономии энергетических ресурсов. Анализ и повышение энергоэффективности систем теплообмена следует проводить на основе эксергетического анализа.

## ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МЕТОДА ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО ПИНЧ-АНАЛИЗА

Достоинства эксергетического анализа и традиционного Пинч-метода позволяют рассматривать вопрос о разработке единого усовершенствованного метода, который бы являлся эффективным инструментом для структурной и параметрической оптимизации теплотехнических установок и систем в целом с учетом качества тепловой энергии.

### 3.1 Формирование потоков эксергии

На первом этапе проведения эксергетического пинч-анализа необходимо: «разделить все технологические потоки на две группы. В первую группу входят потоки, которые охлаждаются в системе. Такие потоки отдают свою энергию, следовательно, они называются «горячими». Вторая группа потоков – это потоки, которые нагреваются в системе» [81]. Они принимают энергию, поэтому называются «холодными». Изменение эксергии тепловых потоков можно наглядно проанализировать на температурно–эксергетическом графике (рисунок 3.1).

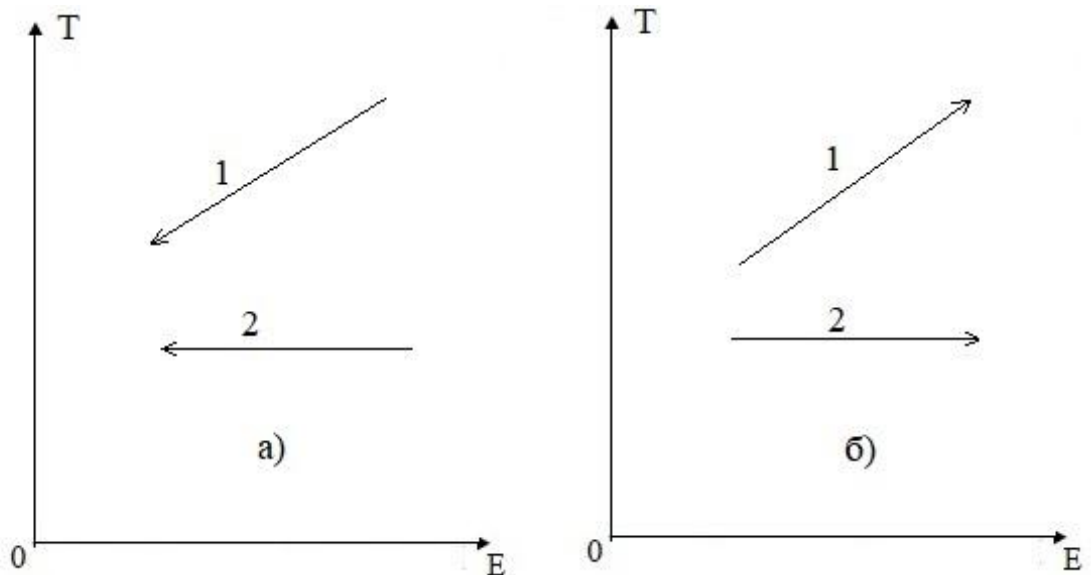


Рисунок 3. 1 – Потоки эксергии на температурно–эксергетической диаграмме: а) горячие потоки: 1 – при охлаждении, 2 – при конденсации; б) холодные потоки: 1 – при нагревании; 2 – при испарении

Горячие тепловые потоки уменьшают свою эксергию при охлаждении или при изменении фазового состояния (рисунок 3.1 а). Следовательно, горячие потоки на графике температура-эксергия обозначают вектором, направленным справа налево. Холодные потоки в



системе увеличивают свою эксергию при нагревании или изменении их фазового состояния. Таким образом, вторая группа потоков обозначается векторной линией, направленной слева направо на графике температура-эксергия (рисунок 3.1 б).

В пинч-анализе эксергия определяется как работа, которая может быть выполнена системой за счет изменения ее тепловой энергии.

При теплообмене между теплоносителями в теплообменниках происходит изменение эксергии, изменяется также температура потоков. Подробное аналитическое вычисление эксергии представлено в главе 1.3.4.

Для практического исследования потоков эксергии необходимо использовать запатентованное устройство для измерения эксергии рабочей среды, которое выводит показания на персональный компьютер и на дисплей [79, 53].

Для проведения анализа необходимо вычислить потоковую теплоемкость. Ее находят по формуле (3.1) [66, 83]:

$$CP = c_p \cdot m, \quad (3.1)$$

где  $CP$  – потоковая теплоемкость,  $\frac{\text{Дж}}{\text{К}\cdot\text{с}}$ ;

$c_p$  – удельная теплоемкость,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ ;

$m$  – массовый расход потока  $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ;

### 3.2 Определение наименьшего теплового напора

Следующим основополагающим понятием, которым оперирует пинч-анализ, является минимальная разность температур [57]. Она обозначается  $T_{\min}$ . Эта разность является тепловым напором между тепловыми потоками при теплообмене.

Этот критерий нужен для того чтобы определить минимальное значение энергоносителей, которое требуется системе извне.

Заданными значениями, которые нельзя изменять, являются: температура начальная, конечная температура. Однако, перемещать по горизонтали положение потоков на графике температура-эксергия можно, так как при таком изменении положения потоки не меняют значения эксергии.

Разность температур между тепловыми потоками по оси температур является движущей силой теплопередачи.

Оптимальный тепловой напор для большинства оборудования определен [66].

- для кожухотрубчатых теплообменников не рекомендуется  $\Delta T_{min}$  меньше  $10^{\circ}\text{C}$ ;
- для пластинчатых теплообменных аппаратов  $\Delta T_{min}$  может достигать  $5^{\circ}\text{C}$ ;
- для пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов  $\Delta T_{min}$  достигает  $1-2^{\circ}\text{C}$ .

Неправильно подобранный этот критерий ведет к большим затратам на производстве.

Например, если разность температур будет равна нулю, то есть составные кривые касаются друг друга, то для передачи энергии между потоками необходима бесконечно большая площадь поверхности теплообмена (бесконечно большая стоимость).

Другой пример. Если слишком увеличить разность температур между потоками, то увеличится потребность во внешних энергоносителях, а рекуперация энергии уменьшается. Следовательно, возрастают капитальные затраты производства.

В своей работе [66] Смит Р., Клемеш Й., Товожнянский Л.Л. утверждают: «При увеличении  $\Delta T_{min}$  увеличивается температурный напор между теплоносителями и уменьшается доступная к рекуперации энергия. Оба эти фактора ведут к уменьшению общей площади поверхности теплообмена рекуперативной системы и, следовательно, к снижению капитальных вложений».

### 3.3 Параметрическая оптимизация систем теплообмена эксергетическим пинч-анализом

Система теплообмена является оптимальной, когда потери эксергии будут минимальны. Данное выражение представлено формулой 3.2:

$$\sum \Delta E \rightarrow \min, \quad (3.2)$$

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

Для этого необходимо, чтобы рекуперация 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  $\Delta T_{min}$ , следует воспользоваться следующей формулой (3.3):

$$\begin{aligned}
\sum \Delta E &= |e_h| - |e_c| + |E_{UH}| - |E_{UC}|, \\
|e_h| - |e_c| &\rightarrow \min, \\
\sum E_{UH} &\rightarrow \min, \\
\sum E_{UC} &\rightarrow \min,
\end{aligned}
\tag{3.3}$$

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  $T_{r1} < T_{r2} < \dots < T_{r(k-1)} < T_{rk}$ ;
- ✓ для холодных потоков  $T_{x1} < T_{x2} < \dots < T_{x(k-1)} < T_{xk}$ ;
- ✓ математическая модель подходит для потоков без фазовых переходов.

Температурный напор не должен быть меньше минимального значения:

- ✓ минимальное значение  $\Delta T_{\min}$  для кожухотрубчатых теплообменников  $10^\circ\text{C}$ ;
- ✓ минимальное значение  $\Delta T_{\min}$  для пластинчатых теплообменных аппаратов  $5^\circ\text{C}$ ;
- ✓ минимальное значение  $\Delta T_{\min}$  для пластинчато-ребристых теплообменных аппаратов  $1-2^\circ\text{C}$ .

Одним из основных этапов эксергетического пинч-анализа, также как и в традиционном, является построение составных кривых [91]. Определение вручную занимает много времени, также нельзя избежать ошибок, связанных с человеческим фактором.

Принципы построения математической модели традиционного пинч-анализа были разработаны Агаповым Д.С. [39]. В своей работе Агапов предложил модель кусочных функций, ввел критерий «степени интеграции тепловых потоков» и показатель «термодинамического совершенства» технической системы.

Особенности математической модели в рамках эксергетического пинч-анализа связаны с построением эксергетических составных кривых. Исходные данные для модели формируются в виде четырех матриц. Первая матрица включает в себя исходные данные горячих потоков (Hot) (формула 3.4), вторая матрица включает в себя исходные данные холодных потоков (Cold) (формула 3.5). 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 температуры и

конечной температуры тепловых потоков, произведение удельной теплоёмкости потоков на массовый расход. Произведение в последнем столбце кратко называется потоковой теплоемкостью. Единица измерения массового расхода - килограмм в секунду. Единица измерения температур в Кельвинах. Третья и четвертая матрица (формула 3.6 и формула 3.7) представляют собой базис температур из первых двух столбцов матриц  $E_H$  и  $E_C$ , соответственно. Значения температур в последних двух матрицах  $T_H$   $T_C$  сортируют по возрастанию [93].

$$E_H = \begin{pmatrix} T_{г.н.1} & T_{г.к.1} & T_{0г.1} & \ln \frac{T_{г.н.1}}{T_{г.к.1}} & CP_{г.1} \\ T_{г.н.2} & T_{г.к.2} & T_{0г.2} & \ln \frac{T_{г.н.2}}{T_{г.к.2}} & CP_{г.2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{г.н.n-1} & T_{г.к.n-1} & T_{0г.n-1} & \ln \frac{T_{г.н.n-1}}{T_{г.к.n-1}} & CP_{г.n-1} \\ T_{г.н.n} & T_{г.к.n} & T_{0г.n} & \ln \frac{T_{г.н.n}}{T_{г.к.n}} & CP_{г.n} \end{pmatrix}. \quad (3.4)$$

$$E_C = \begin{pmatrix} T_{х.н.1} & T_{х.к.1} & T_{0х.1} & \ln \frac{T_{х.н.1}}{T_{х.к.1}} & CP_{х.1} \\ T_{х.н.2} & T_{х.к.2} & T_{0х.2} & \ln \frac{T_{х.н.2}}{T_{х.к.2}} & CP_{х.2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{х.н.m-1} & T_{х.к.m-1} & T_{0х.m-1} & \ln \frac{T_{х.н.m-1}}{T_{х.к.m-1}} & CP_{х.m-1} \\ T_{х.н.m} & T_{х.к.m} & T_{0х.m} & \ln \frac{T_{х.н.m}}{T_{х.к.m}} & CP_{х.m} \end{pmatrix}. \quad (3.5)$$

$$T_H = \begin{pmatrix} T_{z1} \\ T_{z2} \\ \dots \\ T_{zk-1} \\ T_{zk} \end{pmatrix}. \quad (3.6)$$

$$T_C = \begin{pmatrix} T_{x1} \\ T_{x2} \\ \dots \\ T_{xk-1} \\ T_{xk} \end{pmatrix}. \quad (3.7)$$

Функциональные зависимости, формирующие составную кривую горячих потоков, имеют вид (3.8):

для первого температурного интервала:

$$e_h = \left( T_{r2} - T_{r1} - T_0 \ln \frac{T_{r2}}{T_{r1}} \right) \sum_{i=1}^n CP_{ri} \Big|_{T_{r1}}^{T_{r2}}, T_{r1} < T_{r2};$$

для первого и второго температурных интервалов:

$$e_h = \left( T_{r2} - T_{r1} - T_0 \ln \frac{T_{r2}}{T_{r1}} \right) \sum_{i=1}^n CP_{ri} \Big|_{T_{r1}}^{T_{r2}} + \left( T_{r3} - T_{r2} - T_0 \ln \frac{T_{r3}}{T_{r2}} \right) \sum_{i=1}^n CP_{ri} \Big|_{T_{r2}}^{T_{r3}}, T_{r1} < T_{r2} < T_{r3};$$

для (k-1)-х температурных интервалов:

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

для k-х температурных интервалов:

$$e_h = \sum_{j=1}^{j=k} \left[ \left( T_{rj} - T_{r(j-1)} - T_0 \ln \frac{T_{rj}}{T_{r(j-1)}} \right) \sum_{i=1}^n CP_{ri} \Big|_{T_{r(j-1)}}^{T_{rj}} \right], T_{r(k-1)} < T_{rk}. \quad (3.8)$$

где n-количество тепловых потоков на заданном интервале

Функциональные зависимости, формирующие составную холодную потоков, имеют вид (3.9):

для первого температурного интервала:

$$e_c = \left( T_{x2} - T_{x1} - T_0 \ln \frac{T_{x2}}{T_{x1}} \right) \sum_{i=1}^n CP_{xi} \Big|_{T_{x1}}^{T_{x2}}, T_{x1} < T_{x2};$$

для первого и второго температурных интервалов:

$$e_c = \left( T_{x2} - T_{x1} - T_0 \ln \frac{T_{x2}}{T_{x1}} \right) \sum_{i=1}^n CP_{xi} \Big|_{T_{x1}}^{T_{x2}} + \left( T_{x3} - T_{x2} - T_0 \ln \frac{T_{x3}}{T_{x2}} \right) \sum_{i=1}^n CP_{xi} \Big|_{T_{x2}}^{T_{x3}}, T_{x1} < T_{x2} < T_{x3};$$

для (k-1)-х температурных интервалов:

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

для k-х температурных интервалов:

$$e_c = \sum_{j=1}^{j=k} \left[ \left( T_{xj} - T_{x(j-1)} - T_0 \ln \frac{T_{xj}}{T_{x(j-1)}} \right) \sum_{i=1}^n CP_{xi} \left| \begin{array}{c} T_{xj} \\ T_{x(j-1)} \end{array} \right. \right], T_{x(k-1)} < T_{xk}. \quad (3.9)$$

Начальная и конечная температура тепловых потоков в матрицах исходных данных (3.4) и (3.5) разделяется на температурные интервалы в матрицах (3.6) и (3.7) с учетом возрастания температур. Функциональные зависимости (3.8 и 3.9) представляют собой составные кривые, которые последовательно суммируют эксергии на каждом температурном интервале.

Функции  $e_h(T)$  и  $e_c(T)$  могут быть изображены на одной температурно-эксергетической плоскости (рисунок 3.6).

В процессе оптимизации возникает необходимость процедуры сближения составных кривых относительно оси абсцисс до  $\Delta T_{\min}$ , учитывая критерий оптимизации, представленный формулами (3.2) и (3.3).

Затем определяются оптимальные значения утилит (внешние энергоносители) и значения эксергий составных кривых.

Ниже приведен пример оптимизации системы теплообмена эксергетическим пинч-анализом. Система включает в себя два холодных и два горячих потока. Для начала представим исходные данные потоков в матрицах для горячих и холодных потоков, соответственно.

$$E_H = \begin{array}{c} \left| \begin{array}{cccccc} 393 & 373 & 293 & \ln \frac{393}{373} & 14 \\ 413 & 363 & 293 & \ln \frac{413}{363} & 10 \end{array} \right| ; \\ \\ E_C = \left| \begin{array}{cccccc} 333 & 373 & 293 & \ln \frac{333}{373} & 7 \\ 363 & 383 & 293 & \ln \frac{363}{383} & 40 \end{array} \right| . \end{array}$$

Затем расположим начальные и конечные температуры потоков с учетом возрастания для горячих и холодных потоков.

$$T_H = \left| \begin{array}{c} 363 \\ 373 \\ 383 \\ 393 \\ 413 \end{array} \right| ;$$

$$T_c = \begin{matrix} |333| \\ |363| \\ |373| \\ |383| \\ |393| \end{matrix}.$$

В теории пинч-анализа энтальпию выражают в Вт, так как при расчетах используют массовый расход вещества потока (кг/с). Следовательно, в эксергетическом пинч-анализе эксергия имеет размерность Вт.

Для построения горячей составной кривой воспользуемся выражением (3.8). В данном выражении складываются эксергии на каждом температурном интервале. Эксергия на первом температурном интервале:

$$e_h = \left( 363 - 373 - 293 \ln \frac{363}{373} \right) \cdot 10 = 20,37 \text{ Вт},$$

эксергия на первом и втором температурном интервале:

$$e_h = \left( 363 - 373 - 293 \ln \frac{363}{373} \right) \cdot 10 + \left( 393 - 373 - 293 \ln \frac{393}{373} \right) \cdot (10 + 14) = 133 \text{ Вт}.$$

В итоге, в сумме на трех интервалах эксергия равна:

$$e_h = \left( 363 - 373 - 293 \ln \frac{363}{373} \right) \cdot 10 + \left( 393 - 373 - 293 \ln \frac{393}{373} \right) \cdot (10 + 14) + \left( 413 - 393 - 293 \ln \frac{413}{393} \right) \cdot 10 = 187,64 \text{ Вт}.$$

Аналогично рассчитывается холодная составная кривая:

Эксергия на первом температурном интервале:

$$e_c = \left( 363 - 333 - 293 \ln \frac{363}{333} \right) \cdot 7 = 33 \text{ Вт},$$

эксергия на первом и втором температурном интервале:

$$e_c = \left( 363 - 333 - 293 \ln \frac{363}{333} \right) \cdot 7 + \left( 373 - 363 - 293 \ln \frac{373}{363} \right) \cdot (40 + 7) = 128,84 \text{ Вт}.$$

В итоге, в сумме на трех интервалах эксергия равна:

$$e_c = \left( 363 - 333 - 293 \ln \frac{363}{333} \right) \cdot 7 + \left( 373 - 363 - 293 \ln \frac{373}{363} \right) \cdot (40 + 7) + \left( 383 - 373 - 293 \ln \frac{383}{373} \right) \cdot 40 = 218,77 \text{ Вт}$$

Ниже приведено построение сближенных составных кривых на температурно-энергетической плоскости, использующее математическую модель (рисунок 3.2).

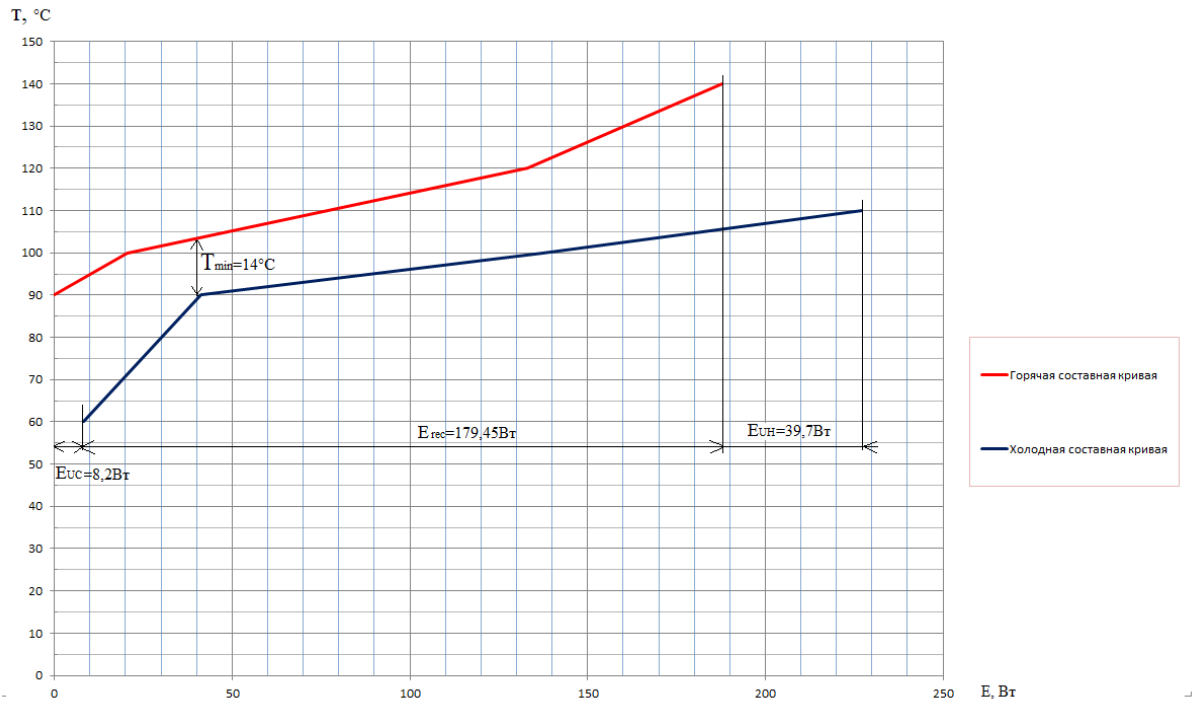


Рисунок 3.2 – Сближенные составные кривые до  $T_{\min}$

В данном примере кривые построены при  $\Delta T_{\min}=14^{\circ}\text{C}$ .

В статье «Эксергетический анализ котла посредством пинч-метода» [81] данный этап описывается следующим образом: «Проекция кривых на ось эксергии частично перекрывают друг друга. Это значит, что эксергия, отводимая от «горячих потоков», может быть использована для нагрева «холодных потоков» посредством рекуперации. Также у каждой из составных кривых существует участок, проекция которого на ось энтальпии не перекрывается проекцией второй кривой, то есть холодная составная нуждается во внешнем источнике тепла ( $E_{UH}$ ), а горячая – требует дополнительного внешнего охлаждения ( $E_{UC}$ )».

Для продемонстрированного примера на рисунке 3.6.  $E_{REC}=179,45\text{Вт}$ ,  $E_{UH} = 39,7 \text{ Вт}$ ,  $E_{UC} = 8,2 \text{ Вт}$ . Таким образом, критерий оптимизации выполнен:

$$\sum \Delta E = 187,64 - 218,77 + 39,7 - 8,2 = 0.$$



### 3.4 Структурная оптимизация системы теплообменников методом эксергетического пинч-анализа

После проведения параметрической оптимизации необходимо построить систему теплообменников, для этого проводится структурная оптимизация. При проектировании теплообменных систем используется ряд правил традиционного пинч-метода [83], 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 3.3 [66]:

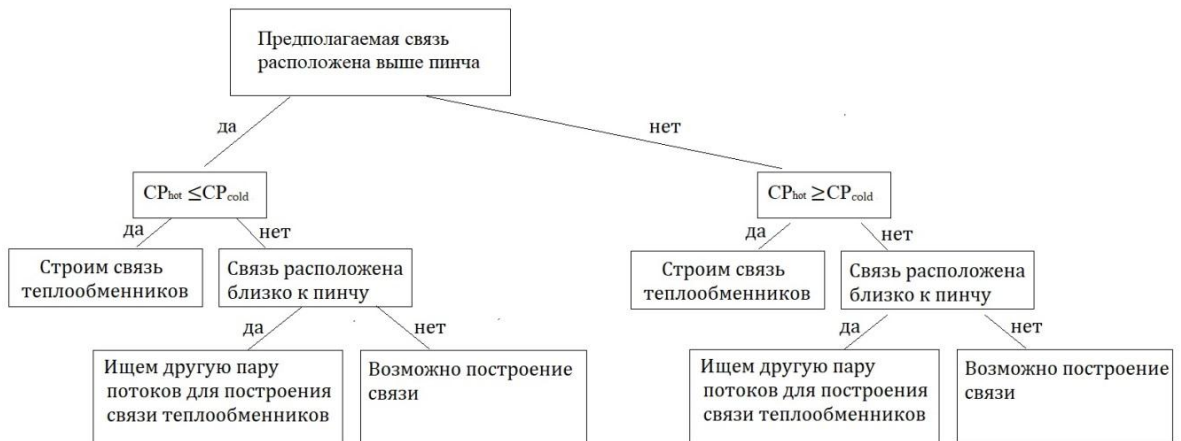


Рисунок 3.3 – Алгоритм для построения связи между теплообменниками

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

Приведем порядок построения теплообменной системы для примера, приведенного выше.

На первом этапе разделяем систему на подсистемы выше пинча и ниже пинча (рисунок 3.4).

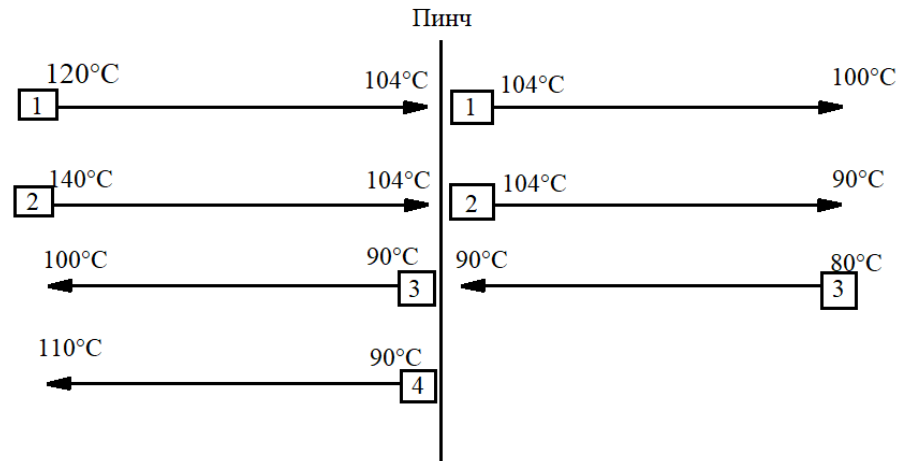


Рисунок 3.4 – Разделение тепловых потоков

Затем строим теплообменники, начиная от пинча и соблюдая правило, что выше пинча потоковая теплоемкость горячих потоков должна быть меньше или равна потоковой теплоемкости холодных потоков (рисунок 3.5). Для удобства потоковая теплоемкость и эксергия записываются слева и справа от графика.

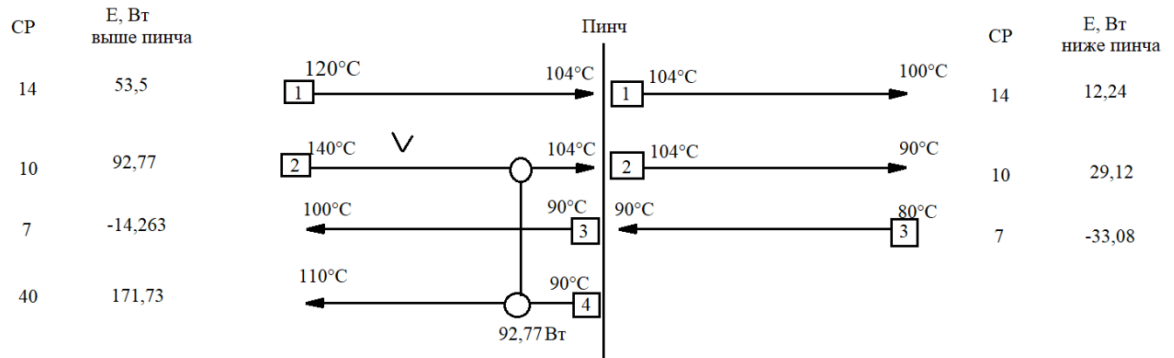


Рисунок 3.5 – Построение первого теплообменника в системе

Горячий поток 2 полностью отдает свое тепло холодному потоку 4, следовательно, над горячим потоком ставится галочка (требования по эксергии удовлетворены). Затем необходимо обозначить, сколько эксергии задействовано в этом теплообменнике (92,77 Вт).

Холодный поток 4 имеет остаток эксергии 78,96 Вт, это значит, что можно еще составить теплообменную связь с горячим потоком 1 (рисунок 3.5). Проставляется галочка над потоком 1 (требования по эксергии удовлетворены). Обозначаем, сколько эксергии задействовано в этом теплообменнике (53,5 Вт). Но в потоке 4 еще остается эксергия, а горячие потоки все задействованы, следовательно, дальше используется тепло внешних энергоресурсов (25,46 Вт).

Также можно определить, от какой температуры будет нагреваться холодный поток 4 внешним источником тепла, используя формулу (1.12):

$$25,46 = 40 \cdot \left[ T_1 - 383 - 293 \cdot \ln \frac{T_1}{383} \right].$$

Получилось уравнение с одной неизвестной. После решения данного уравнения  $T_1$  равно  $107,3 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Построение второго теплообменника в системе представлено на рисунке 3.6.

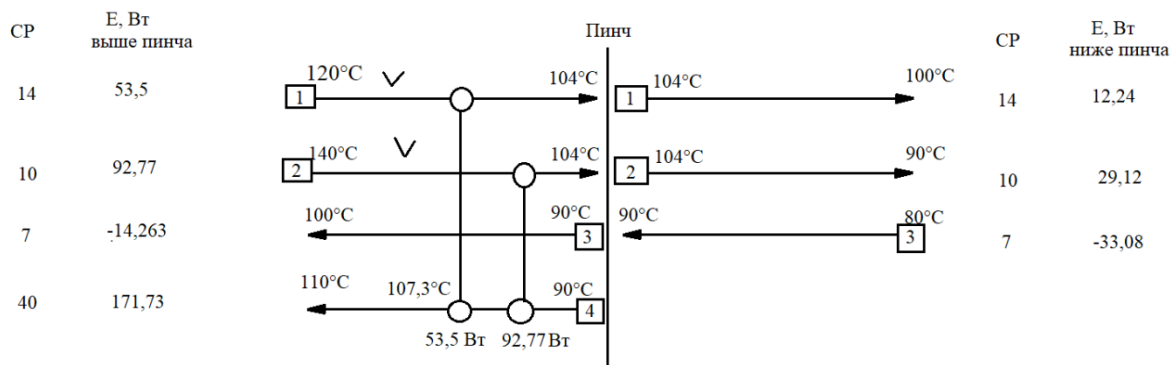


Рисунок 3.6 – Построение второго теплообменника в системе

Аналогичным образом происходит построение остальных теплообменников. Завершенная система теплообменников после оптимизации представлена на рисунке 3.7.

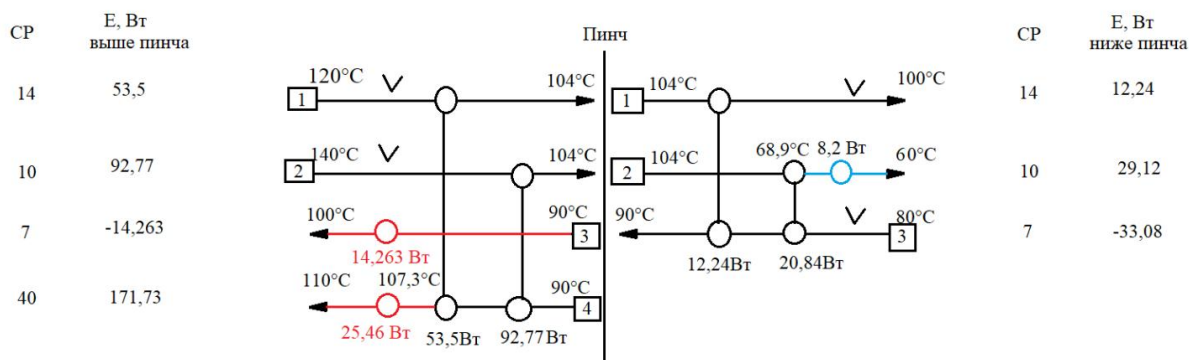


Рисунок 3.7 – Оптимизированная система теплообмена эксергетическим пинч-анализом

При создании систем теплообмена следует придерживаться правил [41, 4]: «изменение проекта должно быть экономически выгодно, то есть дополнительные капитальные затраты не должны превышать нормативный срок окупаемости; система теплообмена должна быть достаточно гибкой, то есть должна эффективно работать даже при изменении состава сырья; вводимые в проект аппараты должны быть простыми и стандартными; поток, который направляется в аппарат воздушного охлаждения, не должен иметь температуру больше  $125 \text{ } ^\circ\text{C}$ , так как тепловая энергия воздуха не регенерируется и в следствие чего теряется».

### 3.5 Выводы по главе 3

В третьей главе разработан метод эксергетического пинч-анализа объединяющий в себе преимущества эксергетического и пинч-метода для повышения энергоэффективности нефтеперерабатывающего предприятия:

- для проведения параметрической оптимизации эксергетическим пинч-анализом разработана математическая модель;
- для проведения структурной оптимизации эксергетическим пинч-анализом разработан алгоритм.

Необходимо отметить, что предложенный метод эксергетического Пинч-анализа ориентирован на окружающую среду, т.е. учитывает условия эксплуатации технологического оборудования (температуру окружающей среды). Он может быть полезен для такого оборудования, эффективность использования которого напрямую зависит от параметров окружающей среды (например, газотурбинные установки) [85].

Математическая модель параметрической оптимизации и методика проведения эксергетического пинч-анализа были внедрены в проектно-конструкторскую документацию ООО «ПО «Киришинефтеоргсинтез», акт внедрения представлен в Приложение Д.

## **ГЛАВА 4 СТРУКТУРНАЯ И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ ТЕПЛООБМЕНА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИМ ПИНЧ-АНАЛИЗОМ**

Для оценки и повышения энергоэффективности нефтеперерабатывающего предприятия необходимо провести структурную и параметрическую оптимизацию систем теплообмена следующих объектов НПЗ:

- 1) Установка первичной перегонки нефти;
- 2) Внешних источников тепловой энергии для установки первичной перегонки нефти: печь и котельный агрегат.

### **4.1 Эксергетический пинч-анализ установки первичной перегонки нефти**

#### *4.1.1 Анализ действующей установки первой перегонки нефти*

В данной работе произведена оптимизация системы теплообмена действующей установки ЭЛОУ АТ-6 нефтеперерабатывающего завода Российской Федерации.

Установка ЭЛОУ-АТ-6 предназначена для переработки нефти. В установке производится комбинирование блоков подготовки нефти к переработке (ЭЛОУ), первичной перегонки нефти (АТ) [10].

Установка состоит из:

- 1) ректификационной колонны;
- 2) печи для подогрева нефти;
- 3) теплообменного ряда, который необходим для подогрева сырой нефти за счет тепла отходящих продуктовых фракций;
- 4) концевых аппаратов воздушного охлаждения (АВО);
- 5) блока ЭЛОУ; насосного оборудования [58].

От сырьевых насосов нефть двумя параллельными потоками для нагрева направляется в теплообменники:

- первый поток от насосов проходит трубное пространство теплообменников Т-31, Т-32, Т-33/1 и Т33/2, где за счет регенерации тепла первого циркуляционного орошения колонны К-2

(Т-31 и Т-32), мазута из теплообменника Т-4/4 (Т-33/1 и Т33/2) нагревается до температуры 92,63°С.

- второй поток от насосов проходит трубное пространство теплообменников Т-3/1, Т-3/2, Т-3, Т-3А, где за счет регенерации тепла первого циркуляционного орошения колонны К-2 (Т-3/1), второго циркуляционного орошения из теплообменника Т-1/1 (Т-3, Т-3/1), мазута от теплообменника Т-4/2 (Т-3/2, Т-3А) нагревается до температуры 140,71°С.

Для усреднения температуры нефти перед электродегидраторами первой ступени после теплообменников Т-3А и Т-33/2 два потока сырой нефти объединяются [7].

После блока ЭЛОУ нефть разделяется на три потока:

- первый поток проходит трубное пространство теплообменников Т-1/2, Т-1/1, Т-2 и Т-9, где нагревается за счет тепла второго циркуляционного орошения колонны К-2 (Т-9, Т-1/1), дизельного топлива колонны К-2 (Т-1/2, Т-2) до 244,56 °С.

- второй поток проходит трубное пространство теплообменников Т-4/2, Т-4/1, где нагревается за счет тепла мазута колонны К-2 до 243,57 °С.

- третий поток проходит трубное пространство теплообменников Т-4/4, Т-4/3, где нагревается за счет тепла мазута колонны К-2 до 243,82 °С.

Затем все три потока поступают в колонну К-1.

Принципиальная схема установки ЭЛОУ-АТ-6 изображена на рисунке 4.1 [4].

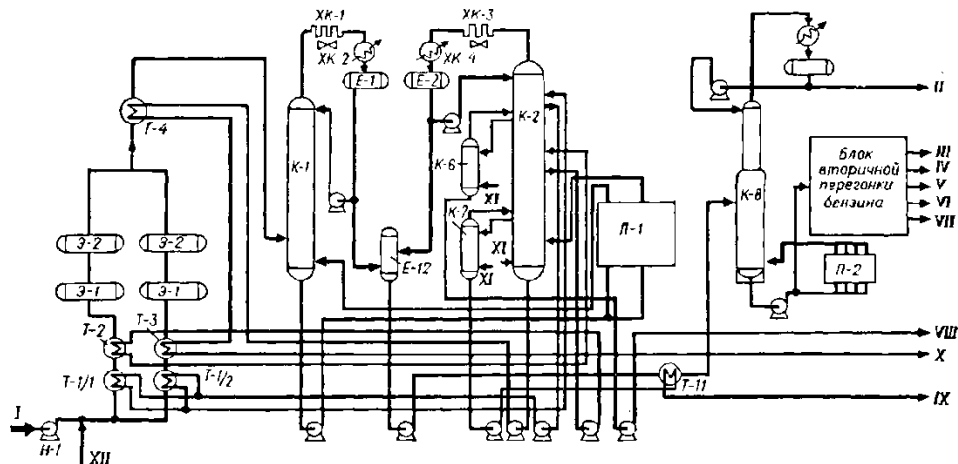


Рисунок 4.1 – Принципиальная схема установки ЭЛОУ-АТ-6

Данные показаний приборов КИПиА установки ЭЛОУ-АТ-6 Киришского нефтеперерабатывающего завода представлены в Приложение Е.

На установке ЭЛОУ-АТ-6 используется схема теплообмена, разработанная с помощью Aspen HYSYS v.8.6[87]. Данная схема изображена на рисунке 4.2 [4].

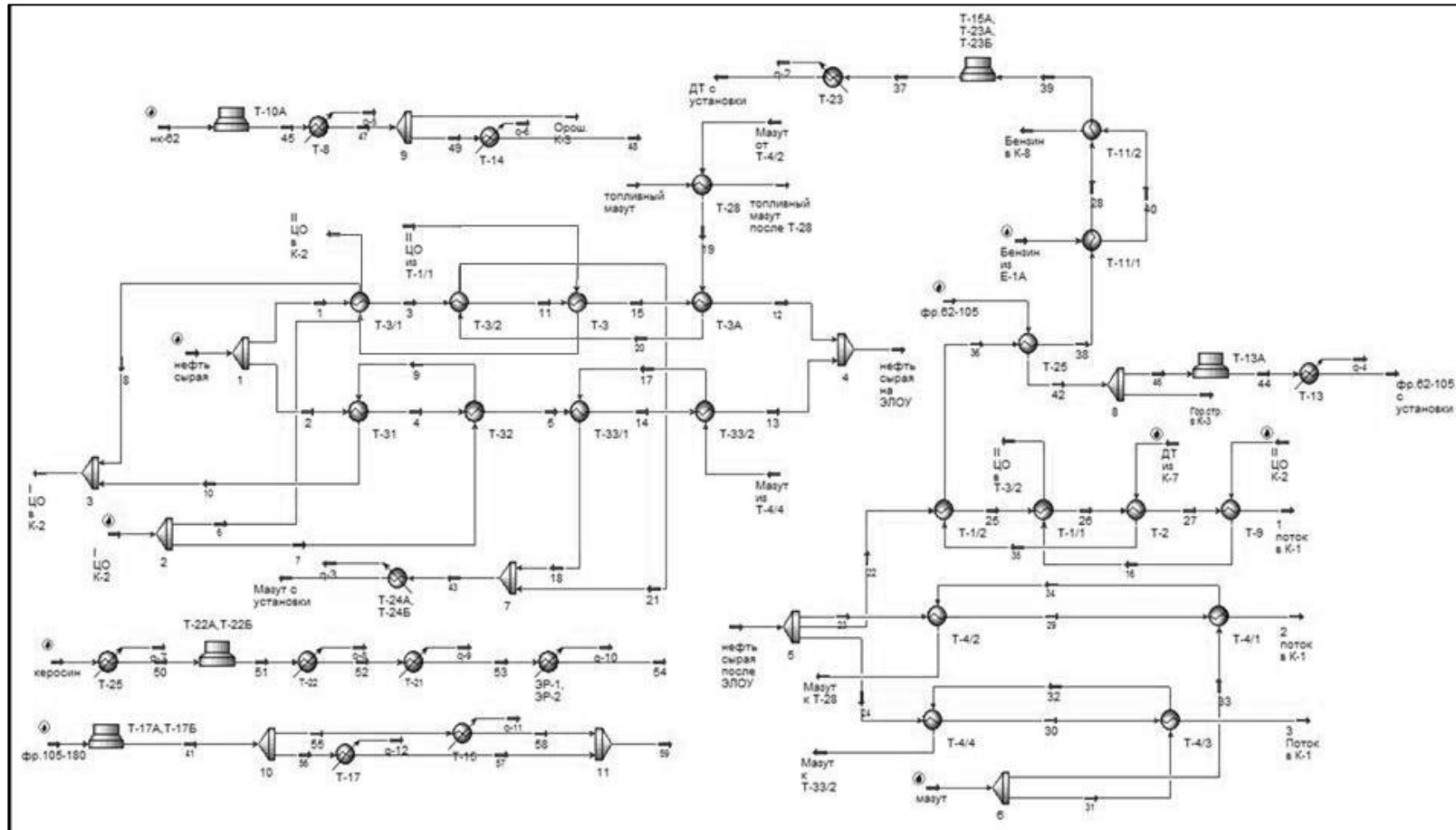


Рисунок 4.2 – Схема теплообмена на установке ЭЛОУ-АТ-6

Для определения эффективности существующей системы используем разработанный метод эксергетического пинч-анализа.

Потоки существующей системы теплообмена были определены выше.

Параметры тепловых потоков представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры тепловых потоков

	Поток	Начальная температура, °С	Конечная температура, °С	Массовый расход кг/с	Удельная теплоемкость, кДж/кг·°С	Эксергия, МВт	Энтальпия, МВт
Холодный поток 1	Нефть до ЭЛОУ	14	119	257,06	1,8	-9,2	-48,58
Холодный поток 2	Нефть после ЭЛОУ	119	243,8	242,84	2,23	-26,72	-67,58
Холодный поток 3	Нефть после К-1	243,8	364	239	2,23	-34,18	-65,09
Горячий поток 1	ДТ из К-7	257	62,5	57,56	2,77	11,108	31,01
Горячий поток 2	Керосин из К-6	137	57,8	27,21	2,52	1,413	5,43
Горячий поток 3	Мазут	355	81	136,38	3,15	50,48	117,71
Горячий поток 4	2 ЦО К-2	261	72,6	83,56	2,79	16,229	43,92
Горячий поток 5	1 ЦО К-2	109	74	161,44	2,26	3,198	12,77
Холодный поток 4	Мазут из топливного кольца	100	121	1,87	2,25	-0,025	-0,088
Холодный поток 5	Бензин из Е-1А	26,6	108	29,77	2,17	-1,019	-5,25
Горячий поток 6	Фракция нк-62	79	33	5,68	1,94	0,08	0,507



## Продолжение таблицы 4.1

Горячий поток 7	Фракция 62-105	119	40	5,87	2,04	0,21	0,94
Горячий поток 8	Фракция 105-180	166	43	6,26	2,2	0,458	1,69

По данным тепловых потоков, представленных в таблице 4.1, строим составные кривые процессов (рисунок 4.3):

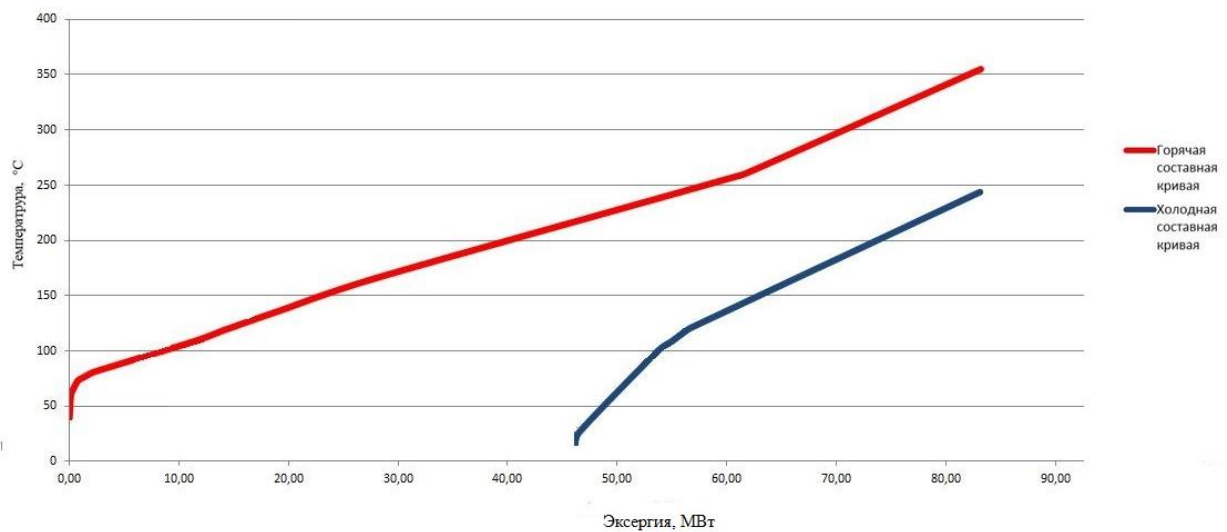


Рисунок 4.3 – Составные кривые существующей установки на графике температура-эксергия

Проанализировав рисунок 4.3, можно сделать следующие утверждения, которые также представлены в статье «Эксергетический пинч-анализ системы теплообмена в технологии переработки нефти» [83]:

- « $\Delta T_{\min}=111,2^{\circ}\text{C}$ , следовательно, есть возможность уменьшать  $\Delta T_{\min}$ ;
- Из нижней части графика видно, что 46,22 МВт эксергии теряется.

Итак, эксергетический пинч-анализ выявил, что существующая схема теплообмена установки не оптимальна.

Система теплообмена имеет большие потери эксергии, данные потери можно уменьшить. Есть возможность нагреть существующими горячими потоками еще один холодный поток. В качестве дополнительного холодного потока возьмем отбензиненную нефть с низа колонны I. Нефть с низа колонны будет донагреваться горячими потоками перед печами Т-1А и Т-1Б, тем самым снизив нагрузку на печи и уменьшив потери эксергии в системе».

#### 4.1.2 Традиционный пинч-анализ установки ЭЛОУ-АТ-6

Для определения преимуществ эксергетического пинч-анализа перед традиционным (энтальпийным) проведем их сравнительный анализ. Решим задачу оптимизации методом энтальпийного пинч-анализа.

Первый этап пинч-анализа заключается в параметрической оптимизации систем теплообмена: построение и сближение составных кривых на плоскости энтальпия-температура [105, 4]. Данный этап позволит определить максимальную теплоту рекуперации и минимальную нагрузку внешних энергоносителей [103]. Рассчитанная энтальпия для каждого температурного интервала для горячих и холодных потоков представлена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Энтальпия на каждом температурном интервале существующей системы теплообмена

Горячие тепловые потоки			Холодные тепловые потоки		
Температурный интервал, °С		Энтальпия, МВт	Температурный интервал, °С		Энтальпия, МВт
355	261	40,38	364	243,8	-65,09
261	257	2,65	243,8	121	-66,50
257	166	74,82	121	119	-1,09
166	137	24,24	119	108	-5,14
137	119	16,28	108	100	-4,25
119	109	9,17	100	26,6	-38,71
109	81	35,88	26,6	14	-5,83
81	79	1,70	-	-	-
79	74	4,31	-	-	-
74	72,6	0,68	-	-	-
72,6	62,5	2,67	-	-	-
62,5	57,8	0,50	-	-	-
57,8	43	0,54	-	-	-
43	40	0,07	-	-	-
40	33	0,08	-	-	-

На рисунке 4.4 представлены сближенные составные кривые системы теплообмена установки ЭЛОУ-АТ-6. Составные кривые сближены до  $T_{\min}=10^{\circ}\text{C}$ . Точка пинча:  $t_{\text{гор}} = 257^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{хол}} = 247^{\circ}\text{C}$ .

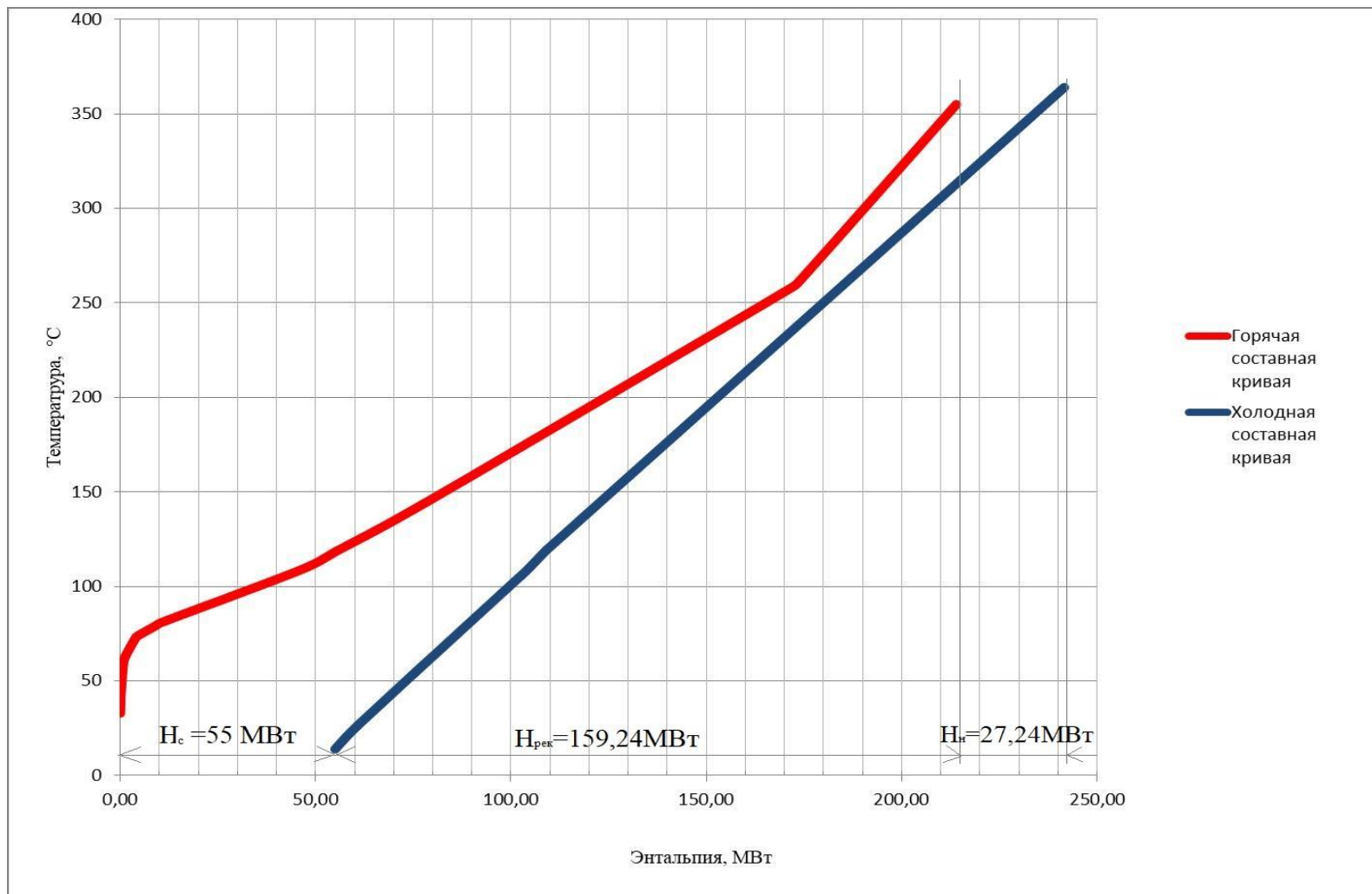


Рисунок 4.4 – Составные кривые в системе координат «энтальпия-температура»

Проанализировав график составных кривых (рисунок 4.4), можно определить особенности тепловых процессов в установке:

- 1) Холодная составная кривая нуждается во внешнем источнике тепла, который дает 27 МВт энтальпии.
- 2) Горячая составная кривая требует доохлаждения 55 МВт энтальпии.
- 3) Теплота рекуперации данной схемы равна 159,24 МВт.

Следующий этап пинч-анализа - создание развязки теплообменного оборудования с оптимальным теплообменом [85]. Разрабатывается схема программой Aspen Energy Analyzer v.8.6. Результаты представлены на рисунке 4.5.

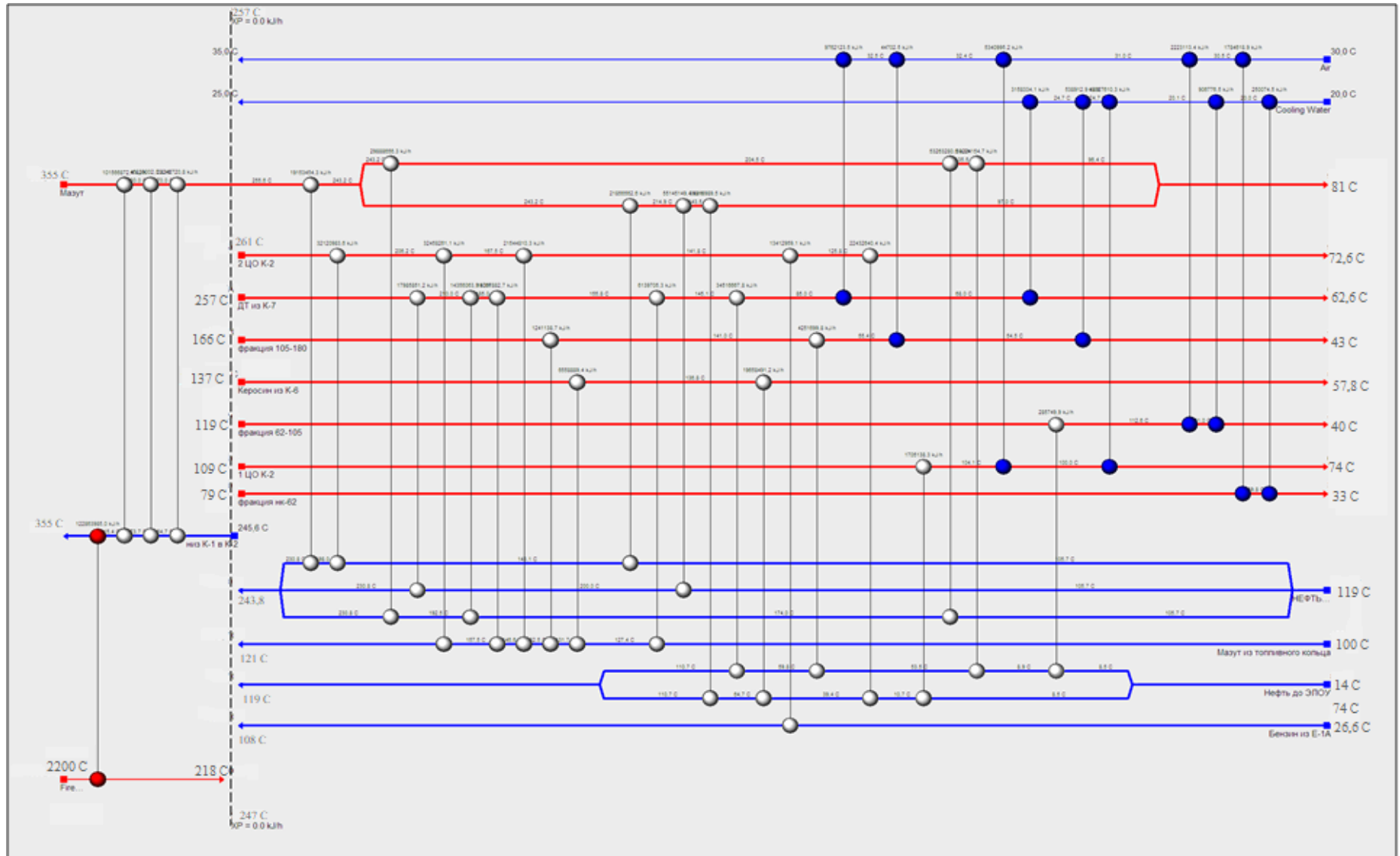


Рисунок 4.5 – Схема теплообмена установки ЭЛОУ АТ-6 после преобразования пинч-методом

#### 4.1.3 Оптимизация установки ЭЛОУ-АТ-6 методом эксергетического пинч-анализа

В эксергетическом методе оптимизация теплоэнергетической системы подразумевает поиск экстремального значения эксергетической целевой функции, либо минимизацию приведенных затрат на единицу эксергии получаемого продукта. Потери эксергии при этом определяются как сумма потерь частных эксергетических потоков в отдельных элементах системы. В пинч-анализе мы определяем потери эксергии двумя способами:

- 1) суммирование потерь эксергии отдельных потоков системы,
- 2) суммирование потерь эксергии в температурных интервалах [66].

Необходимо заметить, для расчета эксергии все температуры переведены по шкале Кельвина, но для наглядности в таблицах и графиках температуры представлены в градусах Цельсия.

Вычисление эксергии каждого потока выполняется по формуле (1.13).

Пример расчета «Холодного потока 1» (нефть до ЭЛОУ):

$$\Delta Ex_{x1} = -48,58 \cdot \left( 1 - \frac{273}{336,78} \right) = -9,2 \text{ MBtm} .$$

Остальные тепловые потоки рассчитываются аналогично.

Далее необходимо рассмотреть внешние источники энергии.

Недостающая энергия (25 МВт энтальпии), которая необходима для нагрева нефти до 364°C, подводится от внешнего источника тепла, т. е. от двух печей Т-1А и Т-1В. Из технического паспорта печи найдем изменение температуры дымовых газов 2211°C – 218°C.

Количество эксергии, которое отдают печи, определяется по формуле (1.13):

$$\Delta Ex_{печи} = 25 \cdot \left( 1 - \frac{273}{1229,35} \right) = 19,45 \text{ MBtm} .$$

Горячие потоки нуждаются в доохлождении. Для этой цели используются холодильники, где не достигших заданных температур потоки охлаждаются водой и воздухом. Вода нагревается с 20 °С до 25 °С, воздух с 30 °С до 35 °С. Расчет количества эксергии воды и воздуха проводится по формуле (1.13):

$$\Delta Ex_{вода} = -28,5 \cdot \left( 1 - \frac{273}{295,49} \right) = -2,17 \text{ MBtm} ,$$

$$\Delta Ex_{воздух} = -28,5 \cdot \left( 1 - \frac{273}{305,49} \right) = -3,03 \text{ MBtm} .$$

Результаты расчетов эксергии с помощью потоковых данных представлены в таблице

4.3.

Таблица 4.3 – Определение потерь эксергии с помощью потоковых данных

		Эксергия, МВт
Нефть до ЭЛОУ	Холодный поток 1	-9,20
Нефть после ЭЛОУ	Холодный поток 2	-26,72
Нефть после К1	Холодный поток 3	-34,18
ДТ из К-7	Горячий поток 1	11,11
Керосин из К-6	Горячий поток 2	1,41
Мазут	Горячий поток 3	50,48
2 ЦО К-2	Горячий поток 4	16,23
1 ЦО К-2	Горячий поток 5	3,20
Мазут из топливного кольца	Холодный поток 4	-0,03
Бензин из Е-1А	Холодный поток 5	-1,02
Фракция нк-62	Горячий поток 6	0,09
Фракция 62-105	Горячий поток 7	0,21
Фракция 105-180	Горячий поток 8	0,46
Печи	Внешний горячий источник тепла	19,45
Вода	Внешний холодный источник тепла	-2,17
Воздух	Внешний холодный источник тепла	-3,03
Потери эксергии:		26,29

Следовательно, установка теряет 26,29 МВт эксергии.

#### 1. Определение потерь эксергии с помощью составных кривых.

Аналогичные вычисления выполняются, используя температурные интервалы составных кривых (рисунок 4.4).

Составные кривые разбиваются на температурные интервалы, на каждом интервале определяем эксергию горячей составной кривой и холодной составной кривой. Результаты представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Определение потерь эксергии с помощью составных кривых

Температурные интервалы, °С	Эксергия горячей составной кривой, МВт	Эксергия холодной составной кривой,
Печи	19,45	-
364-355	-	-2,77
355-261	21,37	-26,93
261-257	1,29	-1,05
257-243,8	5,19	-3,42
243,8-166	27,34	-18,01
166-137	8,65	-5,6
137-121	4,64	-2,78
121-119	0,55	-0,33
119-109	2,7	-1,38
109-108	0,36	-0,166
108-100	2,83	-1,17
100-81	6,06	-2,49
81-79	0,39	-0,24
79-74	0,94	-0,58
74-72,6	0,14	-0,16
72,6-62,5	0,53	-1,06
62,5-57,8	0,09	-0,45
57,8-43	0,08	-1,22
43-40	0,01	-0,21
40-33	0,01	-0,44
33-26,6	-	-0,33
26,6-14	-	-0,4
охл.вода	-	-2,17
охл.воздух	-	-3,03
Всего:	102,63	76,38
Потери эксергии:		26,29

Потери эксергии также составляют 26,29 МВт.

Итак, используя традиционный эксергетический метод, можно определить общие с потери эксергии в системе, рассчитывая потери на каждом отдельном аппарате и затем суммируя их. Результат тот же, но для этого необходимо иметь уже готовый проект теплоэнергетической системы предприятия, а пинч-анализ позволяет определить потери эксергии для оптимальной технологической схемы предприятия еще до выполнения проекта.



Таким образом, определять потери эксергии целесообразно пинч-анализом. Но традиционный пинч-анализ не дает предложений по уменьшению потерь эксергии.

Оптимизация системы теплообмена эксергетическим пинч-анализом включает в себя два процесса (результата) - параметрическую и структурную оптимизацию. Параметрическая оптимизация – это определение оптимальных параметров тепловых потоков, а структурная – определение оптимальной структуры системы теплообменников.

#### 4.1.3.1 Параметрическая оптимизация системы теплообмена

Далее предложена параметрическая оптимизация установки первичной перегонки нефти эксергетическим пинч-анализом. Определяются оптимальные параметры тепловых процессов, которые имеют минимум потерь эксергии [109].

Эксергия потоков уже рассчитана и представлена в таблице 4.4.

Далее необходимо преобразовать составные кривые методом пинч-анализа с помощью математической модели [94]. Преобразованные тепловые потоки представлены на рисунке 4.6.

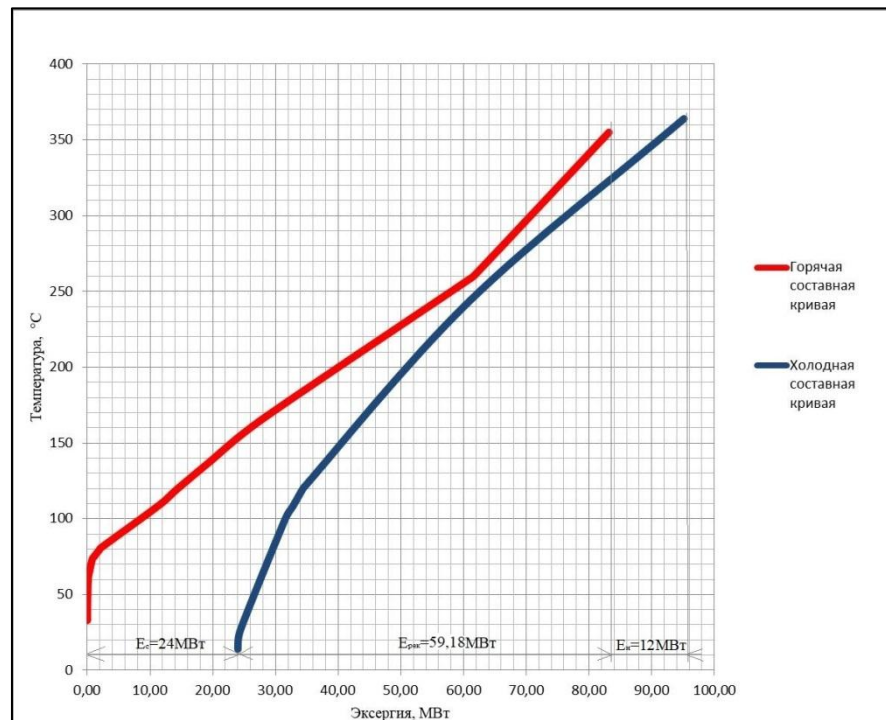


Рисунок 4.6 – Преобразованные тепловые потоки в системе координат «эксергия-температура»

Составные кривые приводятся к минимальной температуре  $T_{\min}=14^{\circ}\text{C}$ , данная температура обусловлена ограничениями математической модели. Точка пинча:  $t_{\text{гор}}=261^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{хол}}=247^{\circ}\text{C}$ .

Данные эксергетического пинч-анализа представлены в таблице 4.5

Таблица 4.5 – Изменения эксергии с помощью потоковых данных

		Эксергия, МВт
Нефть до ЭЛОУ	Холодный поток 1	-9,20
Нефть после ЭЛОУ	Холодный поток 2	-26,72
Нефть после К-1	Холодный поток 3	-34,18
ДТ из К-7	Горячий поток 1	11,11
Керосин из К-6	Горячий поток 2	1,41
Мазут	Горячий поток 3	50,48
2 ЦО К-2	Горячий поток 4	16,23
1 ЦО К-2	Горячий поток 5	3,20
Мазут из топливного кольца	Холодный поток 4	-0,03
Бензин из Е-1А	Холодный поток 5	-1,02
Фракция нк-62	Горячий поток 6	0,09
Фракция 62-105	Горячий поток 7	0,21
Фракция 105-180	Горячий поток 8	0,46
Печи	Внешний горячий источник тепла	12
Вода, воздух	Внешний холодный источник тепла	-24
Потери эксергии:		0,04

Критерий оптимизации выполнен.

Анализ графика составных кривых (рисунок 4.6) опубликован в статье «Эксергетический пинч-анализ системы теплообмена в технологии переработки нефти» [83]:

- 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 24МВт. Для повышения эффективности установки можно использовать это тепло для технологических нужд».

#### 4.1.3.2 Структурная оптимизация системы теплообмена

Следующим этапом эксергетического пинч-анализа является построение оптимальной системы теплообмена – структурная оптимизация.

При построении новой системы теплообменников учитывались теплообменники, которые уже существуют на установке. Система теплообменников после структурной оптимизации представлена на рисунке 4.7. На схеме изображены: белые кружки – это теплообменники между холодными и горячими потоками, красные кружки – это подача эксергии от внешнего горячего источника, голубые кружки – это подача эксергии от внешнего холодного источника.

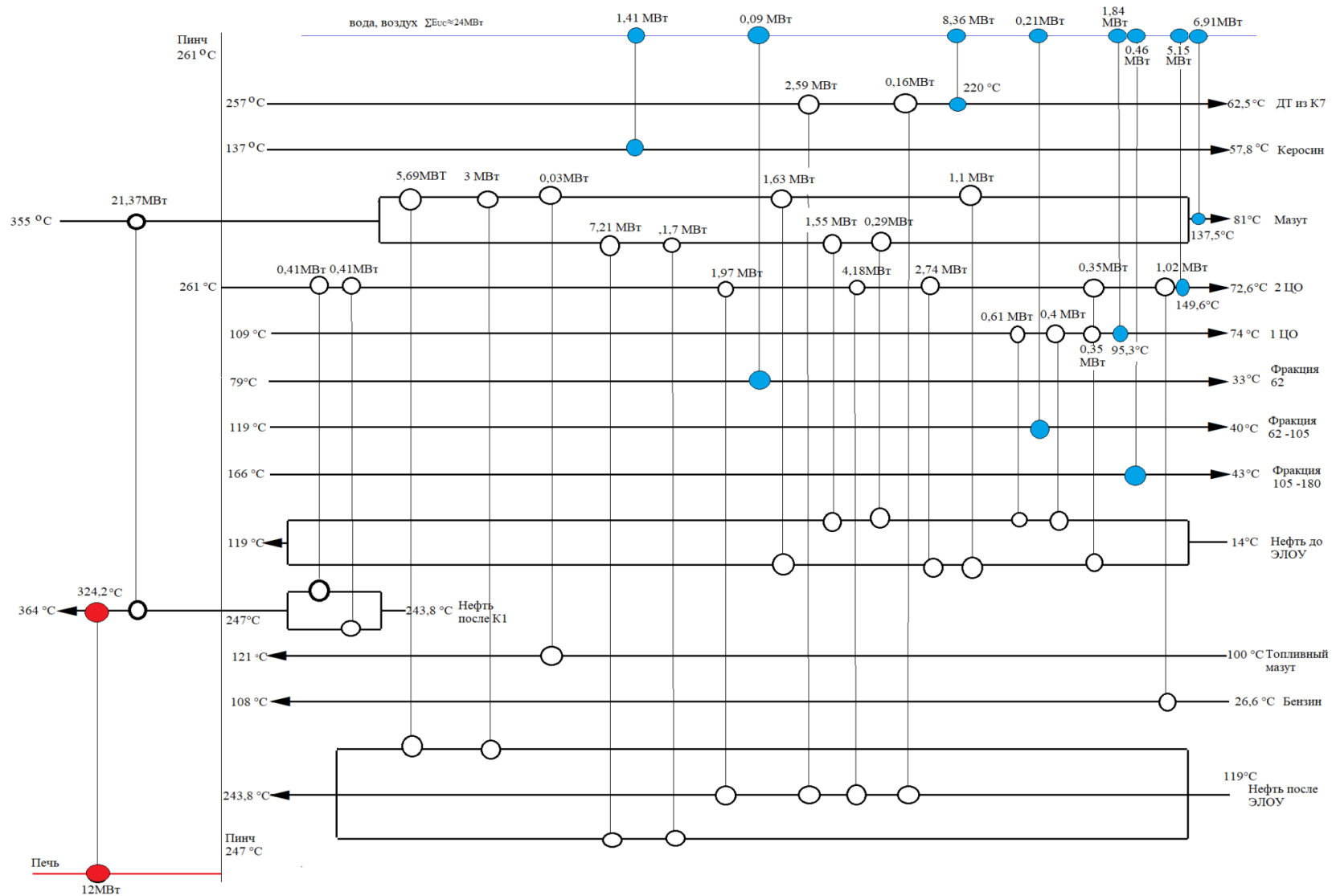


Рисунок 4.7 – Оптимизированная система теплообменников методом эксергетического пинч-анализа

Введённый новый поток (нефть после колонны I) нагревается за счет II циркуляционного орошения и мазута. Для работы системы необходимо 22 теплообменника между потоками, также 9 теплообменников для обеспечения внешними энергоносителями. А при традиционном пинч-анализе необходимо 26 теплообменников между потоками и 11 теплообменников для теплообмена с внешними энергоносителями.

После построения системы теплообмена, заметим, эксергетический пинч-анализ является более эффективным методом оптимизации, потому что количество теплообменников меньше при эксергетическом пинч-анализе, чем при традиционном пинч-анализе. Таким образом, достигается экономическая эффективность. Также изменяется нагрузка внешних энергоносителей.

Оценка энергоэффективности НПЗ эксергетическим пинч-анализом показала, что необходимо провести более детальный анализ источника тепловой энергии. Для этого проведем эксергетический пинч-анализ источника тепловой энергии - печи.

#### 4.2 Анализ системы теплообмена печи в установке первичной перегонки нефти

На действующей установке ЭЛОУ АТ-6 нефтеперерабатывающего завода для подогрева нефти используют две печи. Данные печей представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Теплота печей Т-1А и Т-1В

Печь	МДж/с (МВт)
Т-1А	36,45
Т-1В	36,26
Сумма:	72,76

Печи Т-1А, Т-1В – вертикальные коробчатого типа с высокой интенсивностью нагрева.

Радиантная секция печи состоит из 198 вертикальных труб: 120 труб, обогреваемых с одной стороны и расположенных у стенок печи, и 78 труб, обогреваемых с двух сторон и расположенных в центре печи. Количество потоков – шесть. Расстояние между трубами и пламенем форсунок достаточно большое, чтобы избежать касания труб пламенем. Конвекционная секция состоит из 288 труб. Три самых низших ряда (9 труб в ряд) конвекционной секции состоят из гладких труб, предохраняющих вышележащие ряды от избыточного потока тепла из радиантной секции. Все остальные ряды представляют собой ошипованные трубы [72, 28].

Конвекционные трубы смонтированы горизонтально и поддерживаются при помощи трубных решеток из углеродистой стали на концах и в середине. При этом трубы могут

свободно расширяться в горизонтальном направлении. Обратные калачи и фиттинги расположены внутри коробов.

Отбензиненная нефть, подаваемая в печь, входит в конвекционную секцию в последнем (верхнем) ряду секции и идет противотоком дымовым газам [62].

После нагрева в шок-секции (гладкие трубы), потоки выходят из 1-го ряда шок-секции и направляются в радиантную секцию через наружные переходные участки.

Продукты сгорания после камеры конвекции печей Т-1А, Т-1В направляются в общий дымоход, по которому отводятся в существующую дымовую трубу.

Подогретый теплоноситель из конвекционной секции проходит теплообменник с оребренной поверхностью ТЕ-1А (ТЕ-1В) противотоком воздуху, подаваемому воздуходувками К-1А (К-1В). После воздухоподогревателя «горячее масло» поступает в уравнительную емкость V-1 для поддержания необходимого постоянного уровня для циркуляционных насосов. Байпас ТЕ-1А (ТЕ-1В) с регулятором температуры служит для поддержания температуры «горячего масла» на входе в конвекционную секцию выше точки росы дымовых газов для исключения конденсации и образования кислоты [42].

На приеме циркуляционного насоса установлен фильтр F-1А (F-1В) для предотвращения попадания отложений, грязи, частичек кокса на рабочее колесо насоса.

Для исключения контакта «горячего масла» с воздухом и снижения качества масла, уравнительная емкость V-1 работает под небольшим избыточным давлением азота (1,8 кгс/см<sup>2</sup>).

Для каждой печи предназначен свой воздухоподогреватель, а остальное оборудование данной системы общее для обеих печей.

Циркуляционный насос, фильтр «горячего масла» и воздуходувка обеспечены резервным оборудованием, чтобы предоставить возможность проводить ремонтные и/или подготовительные работы без остановки печей. Воздуходувки К-1А и К-1В работают параллельно, каждая на 50-ти процентной производительности для обеспечения быстрого и надежного резервирования в случае выхода из строя одной из воздуходувок.

При необходимости, с нижних точек оборудования системы подогрева воздуха можно самотеком сдренировать «горячее масло» по закрытой системе в дренажную емкость.

Воздухоподогреватели предназначены для увеличения КПД печей Т-1А, Т-1В на 3,5-8,2 % и улучшения процесса сжигания топлива.

Высокотемпературный жидкофазный органический теплоноситель Терминол-66 циркулирует по схеме: емкость V-1 ⇒ Фильтры F-1А, F-1В ⇒ насосы Р-1А, Р-1В ⇒ змеевики печей Т-1А, Т-1В ⇒ калориферы ТЕ-1А, ТЕ-1В ⇒ емкость V-1.

В змеевиках печей Т-1А, Т-1В теплоноситель нагревается от 160 °С до 280 °С, а затем в калориферах ТЕ-1А, ТЕ-1В охлаждается воздухом от 280 °С до 160 °С. Высокая температура теплоносителя (более 160 °С) необходима для защиты от сернокислотной коррозии змеевиков печей.

Теплоноситель Терминол-66 при рабочей температуре при контакте с воздухом интенсивно окисляется, поэтому с целью предотвращения термического разложения теплоносителя, в емкость V-1 подается инертный газ.

Атмосферный воздух проходит механические фильтры и воздуходувками К-1А, К-1В подается в калориферы ТЕ-1А, ТЕ-1В, где нагревается до температуры 150-240 °С, а затем подается в горелки печей.

В печи реализованы требования для антикоррозийной защиты змеевиков.

Змеевики печей периодически очищаются от сернокислотных отложений и сажи автоматической системой газоимпульсной очистки (ГИО).

В связи с содержанием в жидком топливе до 2,5 % серы, с целью увеличения срока службы и снижения вредного воздействия сернистых соединений на змеевики воздухоподогревателя, необходимо температуру теплоносителя поддерживать не ниже 160 °С.

С целью уменьшения образования окислов азота  $\text{NO}_x$  в дымовых газах печей, конструкция горелок позволяет производить двухступенчатое сжигание топлива. В первую ступень подается 60-90 % необходимого для горения топлива воздуха. Образовавшийся газ СО разлагает образовавшиеся окислы азота  $\text{NO}_x$  до молекулярного азота  $\text{N}_2$ . Затем на второй ступени сжигается газ СО. Такая схема сжигания топлива позволяет уменьшить содержание окислов азота  $\text{NO}_x$  до 200 ppm при сжигании мазута и до 100 ppm, при сжигании газа.

#### Характеристика печей Т-1А, Т-1В

По проекту каждая из печей атмосферного блока Т-1А, Т-1В производит нагрев 494500 кг/ч продукта от 240 °С до 375 °С при тепловой нагрузке в 63500000 ккал/ч (проект), 6500 кг/ч пара от 170 °С до 450 °С при тепловой нагрузке в 768000 ккал/ч и 112500 кг/ч циркулирующего теплоносителя («горячего масла») от 160 °С до 280 °С при тепловой нагрузке в 5267400 ккал/ч. Расчетный КПД при проектных условиях 90 %.

Проектный режим работы печи представлен в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Проектный режим работы печи

Общее количество поглощаемого тепла	64268000 ккал/ч +5267400 ккал/ч для подогрева теплоносителя
Тип топлива	газ/мазут
Процент избытка воздуха	10/15 % (газ/мазут)
Гарантированный КПД	89,5 %
Общие потери тепла	1,5 % макс.

Продолжение таблицы 4.7

Температура дымовых газов на выходе из радиантной секции	772 °С
Температура дымовых газов на выходе из конвекционной секции (после секции подогрева «горячего масла»)	189 °С
Полная теплопроизводительность	71408000 ккал/ч
Температура подогрева воздуха после воздухоподогревателя	150-240 °С
Температура воздуха перед воздухоподогревателем (для справки)	15 °С

Более подробно устройство и работа системы ГИО описаны в производственной инструкции И.СМК-Ш-01-Т-21 «Система газоимпульсной очистки (ГИО) камер конвекции печей Т-1А, Т-1В, П-1/1 установки ЭЛОУ-АТ-6. Эксплуатация и обслуживание».

#### 4.2.1 Традиционный пинч-анализ печи

Первый этап пинч-анализа заключается в определении тепловых потоков печи. Для анализа первой возьмем печь Т-1В. Печи Т-1А и Т-1В идентичные, следовательно, расчеты будут схожи. На рисунке 4.8 изображена схема печи и ее рабочие потоки.

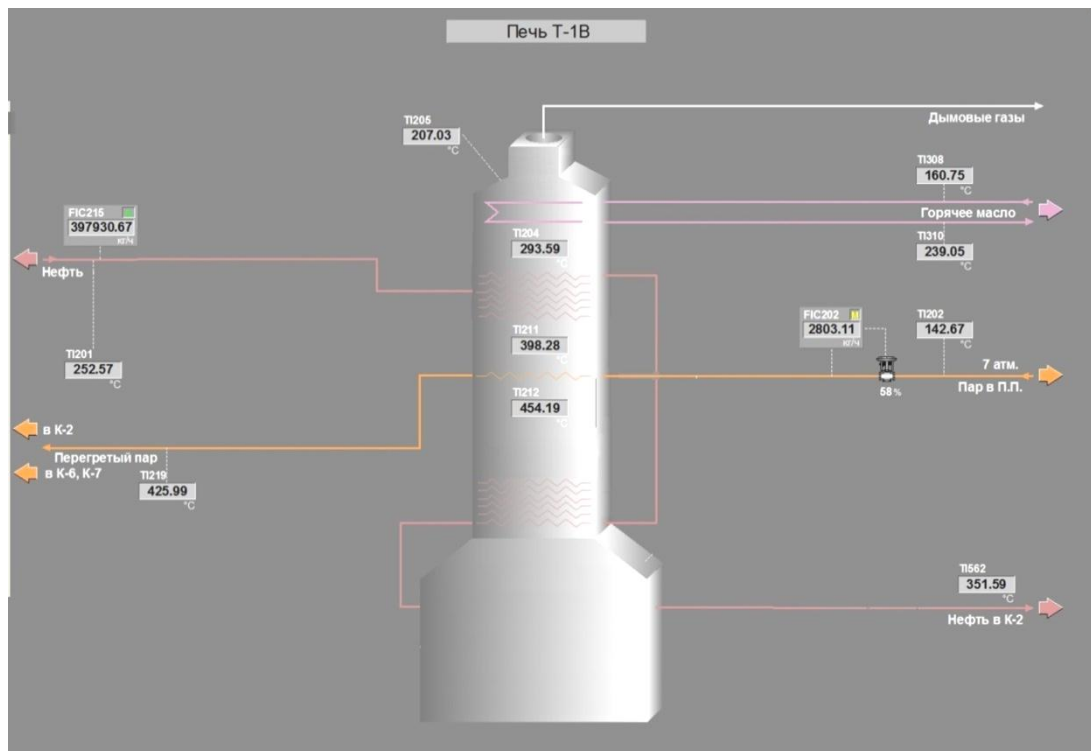


Рисунок 4.8 – Схема печи установки АТ-6

Ниже приведен расчет радиантной секции печи.

Низшая теплотворная способность топлива определяется по уравнению Менделеева [84]:



$$Q_p^H = 42215,504 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Часовой расход топлива:

$$B = 0,63 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Количество газов, образующихся при сгорании 1 кг топлива:

$$m_{CO_2} = 0,03667 \cdot C = 0,03667 \cdot 85 = 3,117 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$$

$$m_{H_2O} = 0,09 \cdot H + 0,01 \cdot W + W_{\phi} = 0,09 \cdot 13 + 0,01 \cdot 0 + 0 = 1,17 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$$

$$m_{O_2} = L_0 \cdot (\alpha - 1) \cdot 0,232 = 14,26 \cdot (1,25 - 1) \cdot 0,232 = 0,8271 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$$

$$m_{N_2} = \alpha \cdot L_0 \cdot 0,768 = 1,25 \cdot 14,26 \cdot 0,76 = 13,689 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$$

$$m_{SO_2} = 0,02 \cdot S = 0,02 \cdot 1 = 0,02 \frac{\text{кг}}{\text{кг}}$$

Температура продуктов сгорания, покидающих топку:

$$T_n = 1045,81 \text{ K.}$$

Теплосодержание продуктов сгорания при температуре  $T_n=1045,81\text{K}$  определяется по формуле (4.1):

$$H = (T_n - 273) \cdot (m_{CO_2} \cdot CO_2 + m_{H_2O} \cdot H_2O + m_{O_2} \cdot O_2 + m_{N_2} \cdot N_2 + m_{SO_2} \cdot SO_2). \quad (4.1)$$

$$H = (1042,81 - 273) \cdot (3,117 \cdot 1,06825 + 1,17 \cdot 2,0514 + 0,8271 \cdot 1,0071 + 13,6896 \cdot 1,07915 + 0,02 \cdot 0,7534) = 16638 \text{ кДж/кг.}$$

Рассчитываем количество тепла, переданное продукту в радиантной секции по формуле (4.2):

$$Q_p = (Q_p^H \cdot \eta_m - q_{t_n}) \cdot B. \quad (4.2)$$

$$H_{гор1} = Q = (42215,504 \cdot 0,966 - 16638,2) \cdot 0,863 = 20,615 \cdot 10^6 \frac{\text{кДж}}{\text{с}}$$

После расчета тепловых потоков радиантной секции проводится расчет тепловых потоков камеры конвекции.

Нефть через камеру конвекции проходит два раза. Для того чтобы определить количество теплоты горячих потоков, нагревающих нефть, используется формула (1.12):

$$H_{гор2} = Q = 1,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 23 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot (772,81^\circ\text{C} - 454^\circ\text{C}) = 8799 \frac{\text{кДж}}{\text{с}} = 8,799 \text{ МВт,}$$

$$H_{гор4} = 1,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 23 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot (398^\circ\text{C} - 293^\circ\text{C}) = 2898 \frac{\text{кДж}}{\text{с}} = 2,898 \text{ МВт.}$$

В пароперегревателе горячие потоки также рассчитываются по формуле (1.12):

$$H_{гор3} = 1,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 23 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot (454^\circ\text{C} - 398^\circ\text{C}) = 1545 \frac{\text{кДж}}{\text{с}} = 1,545 \text{ МВт.}$$

Перед выходом в дымовую трубу уходящие газы нагревают масло, которое является теплоносителем в воздухоподогревателе:

$$H_{гор5} = 1,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}} \cdot 23 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot (293\text{°C} - 199\text{°C}) = 2594 \frac{\text{кДж}}{\text{с}} = 2,594 \text{ МВт.}$$

Холодные потоки рассчитываются аналогично, по формуле (1.12).

Данные тепловых потоков печи Т-1В представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Энтальпия тепловых потоков печи Т-1В

	Поток	Начальная температура, °С	Конечная температура, °С	Массовый расход, кг/с	Массовая теплоемкость, кДж/кг·°С	Энтальпия, МВт
Горячий поток 1	Радиантная секция	2211	772,81	-	-	20,620
Горячий поток 2	Уходящие газы в конвекционной секции 1	772,81	454	23	1,2	8,799
Горячий поток 3	Уходящие газы в пароперегревателе	454	398	23	1,2	1,545
Холодный поток 1	Пар в пароперегревателе	142,67	425,99	0,78	7,84	-1,729
Горячий поток 4	Уходящие газы в конвекционной секции 2	398	293	23	1,2	2,898
Холодный поток 2	Нефть	243,8	364	119,6	2,1	-30,189
Горячий поток 5	Уходящие газы, нагревающие масло	293	199	23	1,2	2,59
Холодный поток 3	Масло	160	239	15	2,3	-2,72

После расчета энтальпии необходимо изобразить составные кривые. Они представлены на рисунке 4.9.

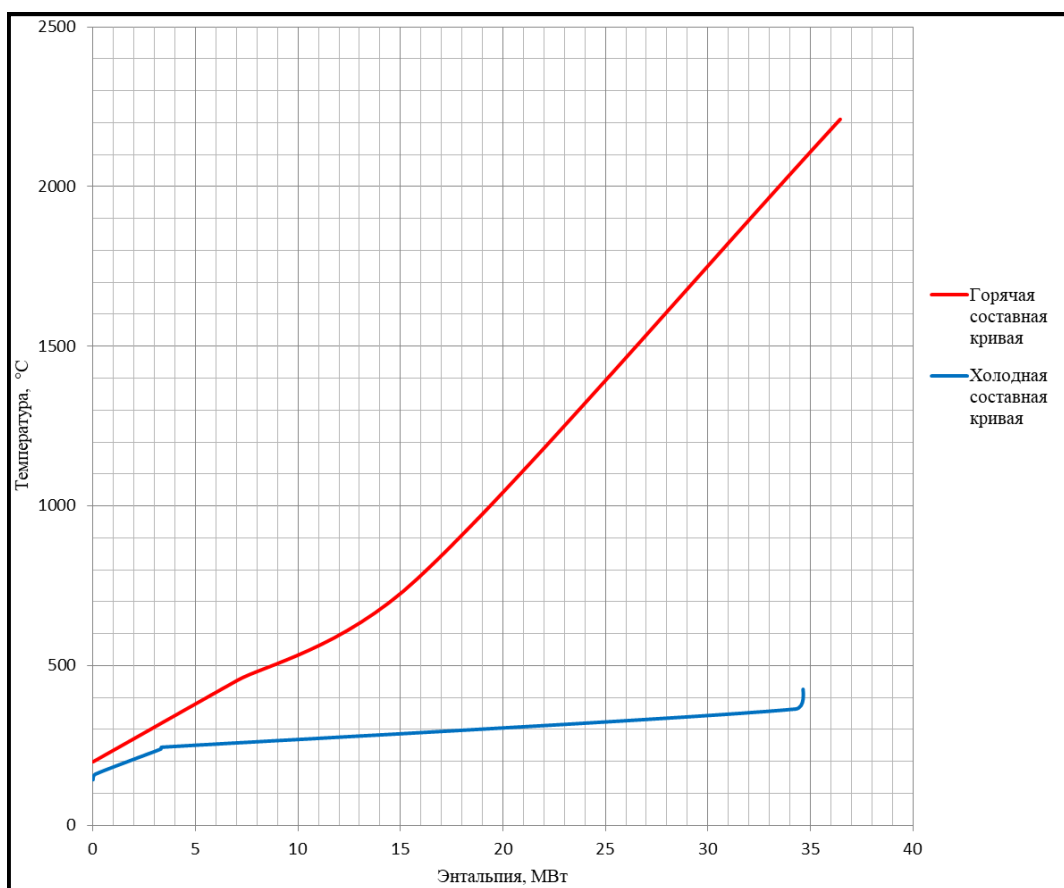


Рисунок 4.9 – Преобразованные тепловые потоки печи в системе координат «энтальпия – температура»

Проанализировав построения, можно сделать вывод, что нецелесообразно проводить синтез новых тепловых потоков, так как после минимального сближения температур количество теплоты рекуперации равно 34,5 МВт. Таким образом энтальпийный метод показывает, что горячие тепловые потоки печи почти целиком отдают свое тепло холодным потокам [92].

#### 4.2.2 Эксергетический пинч-анализ печи

Тепловые потоки печи уже известны.

Эксергия потоков рассчитывается по формуле (1.15). Данные расчетов представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Эксергия тепловых потоков печи Т-1В

	Поток	Начальная температура, °С	Конечная температура, °С	Эксергия, МВт
Горячий поток 1	Радиантная секция	2211	772,81	17,23
Горячий поток 2	Уходящие газы в конвекционной секции 1	772,81	454	5,97
Горячий поток 3	Уходящие газы в пароперегревателе	454	398	0,89
Холодный поток 1	Пар в пароперегревателе	142,67	425,99	-0,87
Горячий поток 4	Уходящие газы в конвекционной секции 2	398	293	1,38
Холодный поток 2	Нефть	243,8	364	-15,85
Горячий поток 5	Уходящие газы, нагревающие масло	293	199	1,5
Холодный поток 3	Масло	160	239	-1,13

Далее необходимо преобразовать составные кривые методом пинч-анализа (рисунок 4.10).

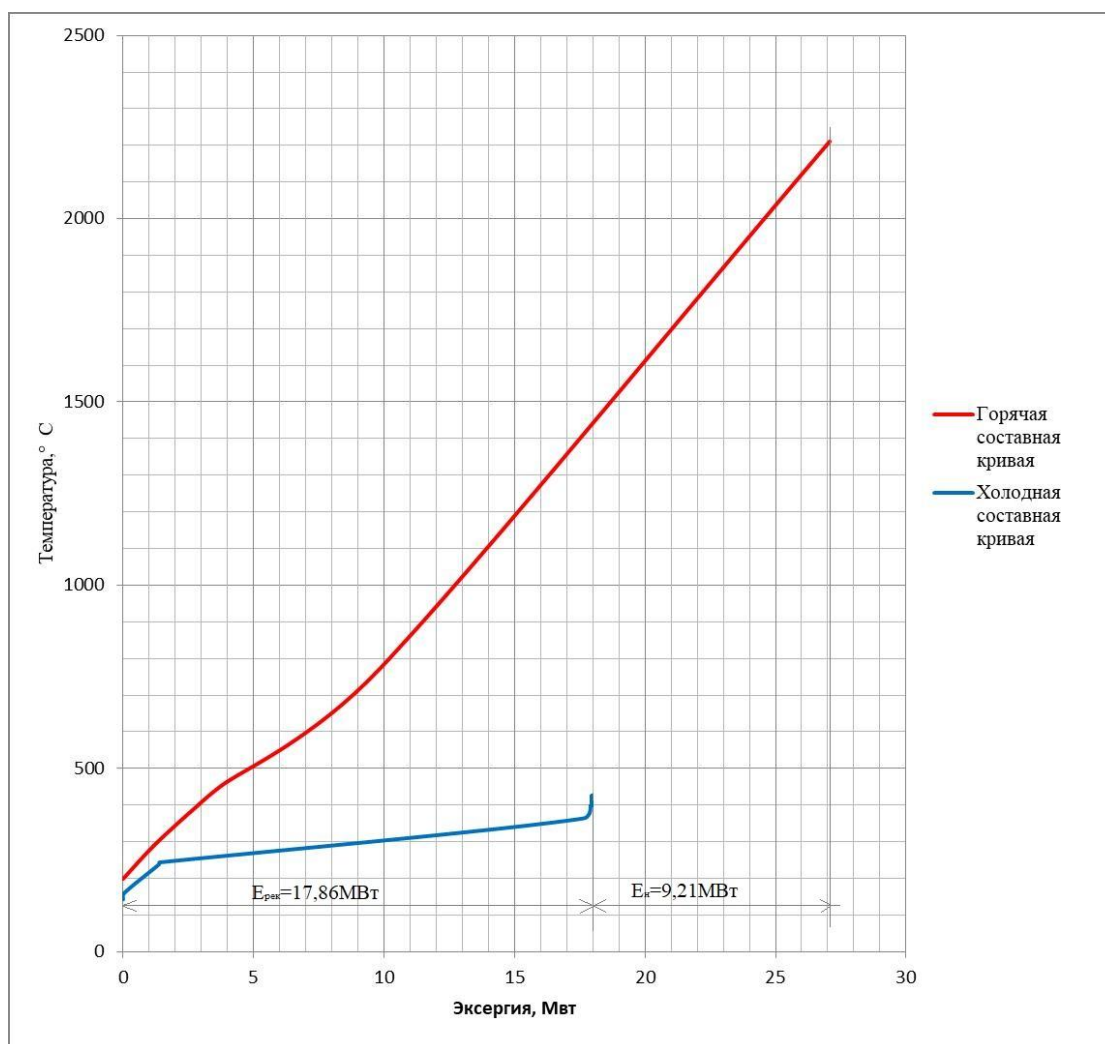


Рисунок 4.10 – Преобразованные тепловые потоки печи в системе координат «эксергия – температура»

В установке ЭЛОУ АТ-6 для нагрева нефти перед колонной 2 используют две печи. Выше проведен анализ печи Т-1В. Печь Т-1А и печь Т-1В аналогичны друг другу. Проводить анализ печи Т-1А нецелесообразно, так как данные по потокам от печи Т-1В отличаются незначительно.

Анализируя график на рисунке 4.10, можем сделать следующие выводы: из верхнего участка графика видно, что часть горячих тепловых потоков не задействована в рекуперации, то есть они представляют собой потери эксергии. Необходимо заметить, что горячие потоки в верхней части графика имеют очень высокие температуры, следовательно, теряется тепло с большим потенциалом.

Таким образом, традиционный пинч-анализ не дает предложений по уменьшению потерь эксергии, а эксергетический пинч-анализ показывает, что необходимо уменьшать потери эксергии в радиантной секции печи (верхний участок горячей составной кривой на рисунке 4.10).

Эксергетический метод также предопределяет необходимость учета эксергии топлива, Сажин Б.С. и Булеков А.П. и Сажин А.Б. утверждают [63]: «Основную долю эксергии топлива составляет его химическая эксергия, так как на практике используют топливо с параметрами, равными параметрам окружающей среды».

Рассчитаем эксергию топлива по формуле (1.19). Топливо – газ, с вышей теплотворной способностью  $Q_v=44,98\text{МДж/кг}$ , расход составляет  $0,863\text{ кг/с}$ .

$$E_{\text{топлива}} = 0,95 \cdot 44,98 \cdot 0,863 = 36,87\text{МВт.}$$

Печь получила  $36,87\text{ МВт}$  эксергии топлива, но горячие потоки отдали  $27\text{ МВт}$  эксергии. Следовательно, потери эксергии топлива составляют  $27\%$ . Это предопределяет необходимость поиска путей по снижению потерь эксергии. Возможно, предположить, что потери происходят из-за не оптимальной конструкции камеры сгорания (или топки) печи.

### 4.3 Анализ котельного агрегата

Вторым по энергоэффективности источником тепла (пара) после печи является котельный агрегат [78]. Многие нефтеперерабатывающие заводы имеют собственные ТЭЦ, которые покрывают  $70\%$  потребности завода в электроэнергии и полностью обеспечивает теплом завод и близлежащие здания [35]. От эффективности котельного агрегата зависит энергоэффективность всего нефтеперерабатывающего завода.

В издании Липова Ю.М. «Компоновка и тепловой расчет парового котла» [40] представлена компоновка парового котла ПП-2650-255 ГМ (рисунок 4.11).

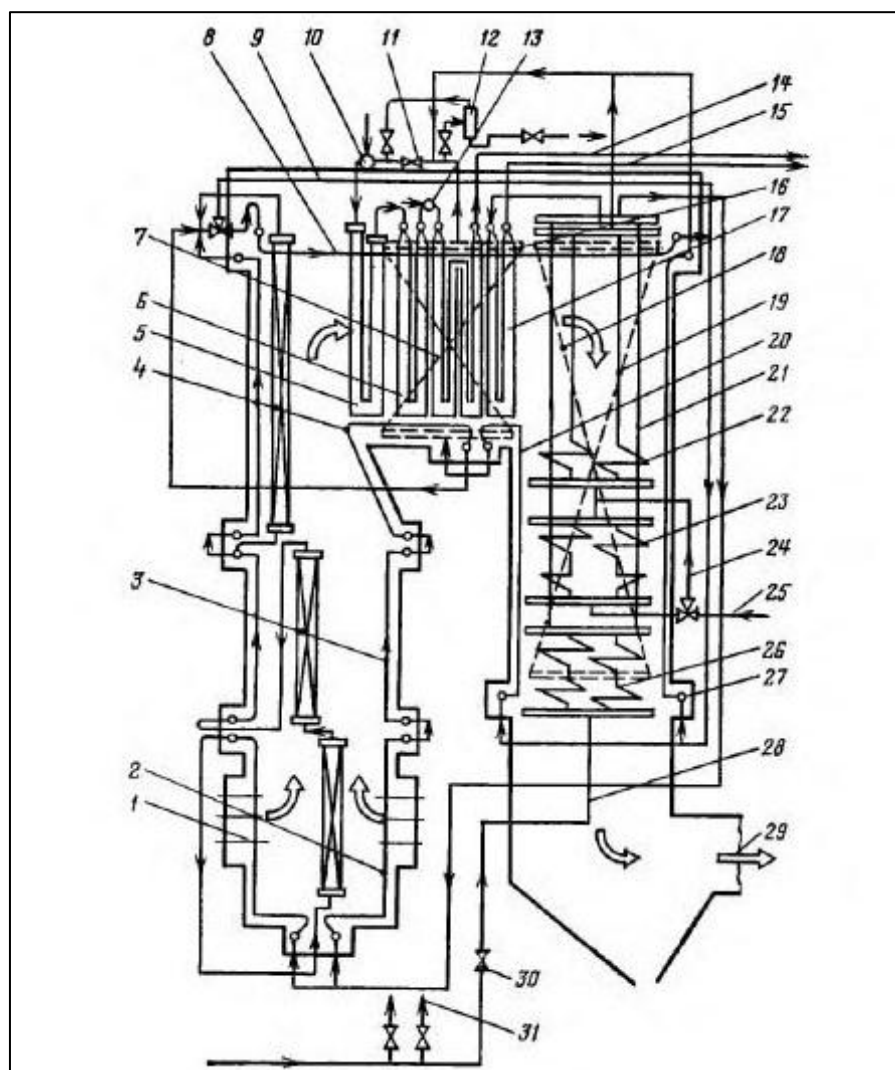


Рисунок 4.11 – Компонка прямоточного парового котла ПП-2650-255 ГМ

«Значения: 1 – газомазутные горелки, 2 – экраны стен и пода, 3 – экраны стен СРЧ, 4 – экраны стен ВРЧ и пода горизонтального газохода, 5 – ширмовый пароперегреватель, 6 – входная ступень конвективного пароперегревателя, 7 – выходная ступень конвективного пароперегревателя, 8 – потолочный экран топки, горизонтального газохода и поворотной камеры, 9 – байпас потолочного экрана, 10 – впрыскивающий парохладитель первой ступени, 11 – встроенная задвижка, 12 – растопочный пароперегреватель, 13 –вспрыскивающий парохладитель второй ступени, 14 –выход перегретого пара сверхкритического давления, 15 – выход вторичного перегретого пара, 16 – боковой экран горизонтального газохода, 17 – выходная ступень вторичного пароперегревателя, 18 – боковой экран конвективной шахты, 19 – паротводящие трубы промежуточной ступени вторичного пароперегревателя, 20 – экран фронтальной стены конвективной шахты и пода горизонтального газохода, 21 – подвесные трубы, 22 – промежуточная ступень вторичного пароперегревателя, 23 – регулирующая ступень вторичного пароперегревателя, 24 – байпас регулирующей ступени, 25 – вход вторичного пара, 26 – промежуточная ступень вторичного пароперегревателя, 27 – выходная ступень вторичного пароперегревателя, 28 – выходная ступень вторичного пароперегревателя, 29 – выход вторичного пара, 30 – байпас регулирующей ступени, 31 – регулирующий клапан»

26 – выход дымовых газов, 27 – задний экран конвективной шахты, 28 – вход питательной воды, 29 – выход дымовых газов, 30 – регулирующий питательный клапан, 31- подача воды на парохладитель» [40].

На рисунке 4.12 приведена тепловая схема котла. Схема показывает температурный и энтальпийный баланс тепловых потоков котельного агрегата ПП-2650-255 ГМ [40].

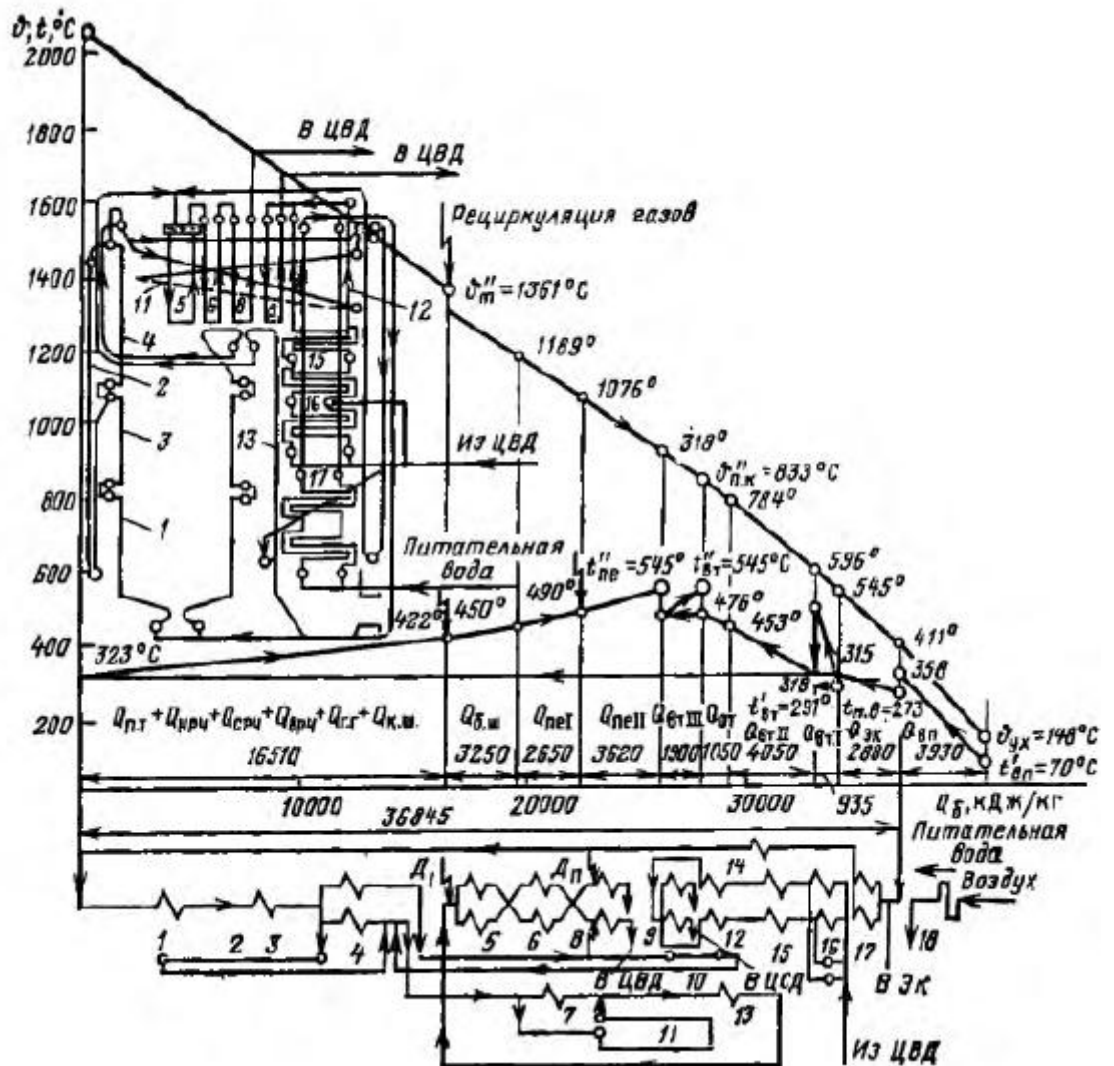


Рисунок 4.12 –Тепловая схема и технологические параметры парового котла ПП-2650-255 ГМ (ТГМП-204)

В издании Липова Ю.М. «Компоновка и тепловой расчет парового котла» [40] употребляются такие значения «1 – НРЧ, 2 – горячие подвесные трубы коробов и горючелочных устройств, 3 –СРЧ, 4 –ВРЧ, 5 – ширмовый пароперегреватель, 6 – первый конвективный пароперегреватель СКД, 7 – потолочный пароперегреватель, 8 – выходной пакет пароперегревателя СКД, 9 – выходная ступень промежуточного пароперегревателя, 10 – подвесная система поворотной камеры, 11 – верхняя и нижняя стяжка экранов



горизонтального газохода, 12 – паропроводящие трубы, 13 – настенные экраны конвективной шахты, 14 – подвесные трубы, 15 – промежуточная ступень промежуточного пароперегревателя, 16 – регулирующая ступень промежуточного пароперегревателя, 17 экономайзер, 18 воздухоподогреватель, 0 – опорная точка» [40].

Енин В. И Денисенко Н. И, Костылев И. И. описывают процесс теплообмена следующим образом [27]: «В процессе теплообмена, происходящем в котле, участвуют две среды: теплопередающая (нагревающая) и тепловоспринимающая (нагреваемая). Теплопередающей средой являются продукты сгорания (дымовые газы). Тепловоспринимающей средой являются вода, пароводяная смесь, пар и воздух. Теплота от нагревающей среды к нагреваемой передается через стенки поверхностей нагрева».

Для проведения эксергетического пинч-анализа, необходимо определить тепловые потоки котла. В статье «Эксергетический анализ котла посредством пинч-метода» [81] определены потоки для котельного агрегата ПП-2650-255 ГМ: «Холодные потоки – это вода в экономайзере, вода в подвесных трубах, пар в экранах стен топки и пода, нагревающийся воздух воздухоподогревателя и т.д.». Таким образом, в котельном агрегате имеется 13 горячих потоков, и 14 холодных потоков. Данные для 27 потоков представлены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Параметры тепловых потоков котла

	Температура начальная, °С	Температура конечная, °С	Массовый расход, кг/с	Удельная теплоемкость, кДж/кг·К	Эксергия, МВт
Уходящие газы в экономайзере	523	391	760	1,20	71,93
Вода в экономайзере	273	315	686	5,06	-70,42
Уходящие газы в подвесных трубах	816	523	90	1,20	17,89
Вода в подвесных трубах	315	320	686	5,43	-9,39
Уходящие газы в экранах стен топки и пода горизонтального газохода	2100	1361	760	1,20	574,26
Испарение воды	320	320	686	-	-367,87
Пар в экранах стен топки и пода горизонтального газохода	320	420	686	7,84	-292,40

Продолжение таблицы 4.10

Уходящие газы в экранах потолка топки, горизонтального газохода, поворотной камеры	1361	1324	760	1,20	27,62
Пар в экранах потолка топки, горизонтального газохода, поворотной камеры	420	440	206	8,38	-20,14
Уходящие газы в экранах горизонтального газохода, конвективной шахты	1324	1311	760	1,20	9,67
Пар в экранах горизонтального газохода, конвективной шахты	424	427	686	8,33	-9,95
Уходящие газы в ширме	1311	1176	760	1,20	99,32
Пар в ширме	417	448	722	7,75	-101,44
Уходящие газы во входной ступени конвективного пароперегревателя	1176	1059	760	1,20	84,21
Пар во входной ступени конвективного пароперегревателя	448	488	722	5,60	-97,69
Уходящие газы в выходной ступени конвективного пароперегревателя	1059	899	760	1,20	111,72
Пар в выходной ступени конвективного пароперегревателя	479	545	736	3,81	-115,85
Уходящие газы в регулирующей ступени вторичного пароперегревателя	592	523	740	1,20	39,64
Пар в регулирующей ступени вторичного пароперегревателя	291	504	127	2,62	-39,65

Продолжение таблицы 4.10

Уходящие газы в промежуточной ступени вторичного пароперегревателя	767	592	740	1,20	107,46
Пар в промежуточной ступени вторичного пароперегревателя	386	455	600	2,43	-58,15
Уходящие газы в отводящих трубах	816	767	760	1,20	32,39
Пар в отводящих трубах	455	478	600	2,28	-19,02
Уходящие газы в выходной ступени вторичного пароперегревателя	899	816	760	1,20	56,07
Пар в выходной ступени вторичного пароперегревателя	478	545	600	2,28	-57,29
Уходящие газы в воздухоподогревателе	391	127	760	1,16	101,83
Воздух в воздухоподогревателе	50	339	350	1,02	-36,32
				Отдали	1334,02
				Приняли	-1295,57

Пар при различных температурах имеет разную удельную изобарную теплоемкость. Пар в некоторых потоках в закритическом состоянии, удельная теплоемкость резко изменяет свои значения. Найти среднюю удельную теплоемкость по формуле (1.16) сложная задача. Разница между начальными и конечными параметрами потоков незначительна. Следовательно, есть возможность использовать следующую формулу (4.3):

$$\bar{c}_p = \frac{c_{pr2} + c_{pr1}}{2}, \quad (4.3)$$

где  $c_{pt1}$  и  $c_{pt2}$  – стандартные удельные изобарные теплоемкости вещества при температурах соответственно  $t_1$  и  $t_2$ .

Зависимость эксергетической функции  $Ex$  для количества теплоты, запасённой тепловым потоком, рассчитываем по формуле (1.15). Средняя удельная теплоемкость воды и пара для потоков представлена в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Средняя удельная теплоемкость воды и пара для потоков

	Температура начальная, °С	Температура конечная, °С	Давление начальное, МПа	Давление конечное, МПа	Удельная теплоемкость начальная, кДж/кг·К	Удельная теплоемкость конечная, кДж/кг·К	Средняя удельная теплоемкость, кДж/кг·К
Вода в экономайзере	273	315	31	30,5	4,77	5,351	5,06
Вода в подвесных трубах	315	320	30,5	28,5	5,351	5,512	5,43
Пар в экранах стен топки и пода горизонтального газохода	320	420	28,5	28	5,512	10,176	7,84
Пар в экранах стен топки и пода горизонтального газохода	420	440	28	27,6	10,176	6,589	8,38
Пар в экранах горизонтального газохода, конвективной шахты	424	427	27,6	27	8,828	7,826	8,327
Пар в ширме	417	448	27	26,5	9,908	5,596	7,75
Пар во входной ступени конвективного пароперегревателя	448	488	26,5	26,2	5,596	4,118	4,857
Пар в выходной ступени конвективного пароперегревателя	479	545	26,2	25,5	4,313	3,3	3,8
Пар в регулирующей ступени вторичного пароперегревателя	291	504	3,9	3,86	2,962	2,279	2,62
Пар в промежуточной ступени вторичного пароперегревателя	386	455	3,86	3,71	2,58	2,287	2,43
Пар в отводящих трубах	455	478	3,71	3,7	2,287	2,278	2,28
Пар в выходной ступени вторичного пароперегревателя	478	545	3,7	3,65	2,278	2,273	2,27

Определим эксергию для уходящих газов в экономайзере («Горячий поток 1») по формуле (1.12) [80]. Температура окружающей среды, взятая для расчетов, равна 0 °С [81, 110].

$$E_{e1} = 1,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{°С}} \cdot 760 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot \left[ 796\text{K} - 664\text{K} - 273\text{K} \cdot \ln \frac{796\text{K}}{664\text{K}} \right] = 71,93 \text{ МВт}.$$

Затем вычисляется эксергия, которую получила вода в экономайзере («Холодный поток 1»):

$$E_{x1} = 5,06 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 686 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot \left[ 546\text{K} - 588\text{K} - 273\text{K} \cdot \ln \frac{546\text{K}}{588\text{K}} \right] = -70,42 \text{ МВт}.$$

Таким способом определяем эксергию для всех элементов котельного агрегата, кроме экрана стен топки и пода горизонтального газохода. Это связано с тем, что эксергия уходящих газов в этом элементе тратится не только на нагрев, но и на испарение воды.

Приведем расчет этого элемента подробнее. Для начала нам необходимо определить эксергию, которую отдают уходящие газы в экранах стен топки и пода горизонтального газохода (от 2100 °С до 1361 °С, «Горячий поток 3»). Воспользуемся формулой (1.15):

$$E_{x3} = 1,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 760 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot \left[ 2373\text{K} - 1634\text{K} - 273\text{K} \cdot \ln \frac{2373\text{K}}{1634\text{K}} \right] = 574,26 \text{ МВт}.$$

Пар в топке совершает два процесса – нагревается и превращается в пар, следовательно, мы будем использовать два вида эксергии.

При осуществлении процессов испарения или конденсации, а также плавления или кристаллизации из расплава, которые идут при постоянной температуре окружающей среды, термическая составляющая эксергии определяется по формуле (1.12) [110].

Рассчитаем эксергию при испарении в топке («Холодный поток 3»):

$$E_{x3} = 686 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot \left( 1400 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} - 2500 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right) \cdot \left( 1 - \frac{273\text{K}}{593\text{K}} \right) = -367,87 \text{ МВт}.$$

Для того, чтобы определить эксергию пара, необходимо узнать среднюю удельную теплоемкость. По таблице определяем удельную теплоемкость пара в топке при начальной и конечной температуре и находим среднюю по формуле (4.3):

$$\bar{c}_p = \frac{5,512 + 10,176}{2} = 7,84 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

При нагреве пара («Холодный поток 4») используем термическую составляющую эксергии, которая находится по формуле (1.15):

$$E_{x4} = 7,84 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 686 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \cdot \left[ 593\text{K} - 693\text{K} - 273\text{K} \cdot \ln \frac{593\text{K}}{693\text{K}} \right] = -292,40 \text{ МВт}.$$

Далее рассчитываются остальные потоки по формуле (1.15), при этом расчетные данные берутся из таблицы 4.10.

Некоторые холодные потоки охлаждаются байпасом. Пар охлаждается с помощью байпаса 1, байпаса 2, байпаса 3 и вторичный пар с помощью байпаса 4. В данном анализе байпас не является холодной утилитой, так как байпас охлаждает холодный поток. А по теории пинч-анализа холодный внешний энергоноситель может охлаждать только горячие потоки.

Рассчитаем количество эксергии, которую байпас получает от пара, по формулам (1.15). Расчетные данные представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Характеристики байпаса

	Температура начальная, °С	Температура конечная, °С	Массовый расход, кг/с	Удельная теплоемкость, кДж/кг·К	Эксергия, МВт
Байпас 1	427	417	36	4,2	0,87
Байпас 2	488	479	14	4,2	0,32
Байпас 3	440	424	480	4,2	18,85
Байпас 4	504	386	478	4,2	140,01
				Итого:	160,05

По теории Пинч-анализа, внешние энергоносители именуется внешними утилитами. Энергоносители, подводящие энергию к системе, такие как пар, горячий газ и т.д., называются горячими утилитами, а энергоносители, отводящие энергию от процессов – охлаждающая вода и др., называются холодными утилитами [95].

Разработанная математическая модель параметрической оптимизации эксергетическим пинч-анализом позволяет построить составные кривые тепловых потоков (рисунок 4.13).

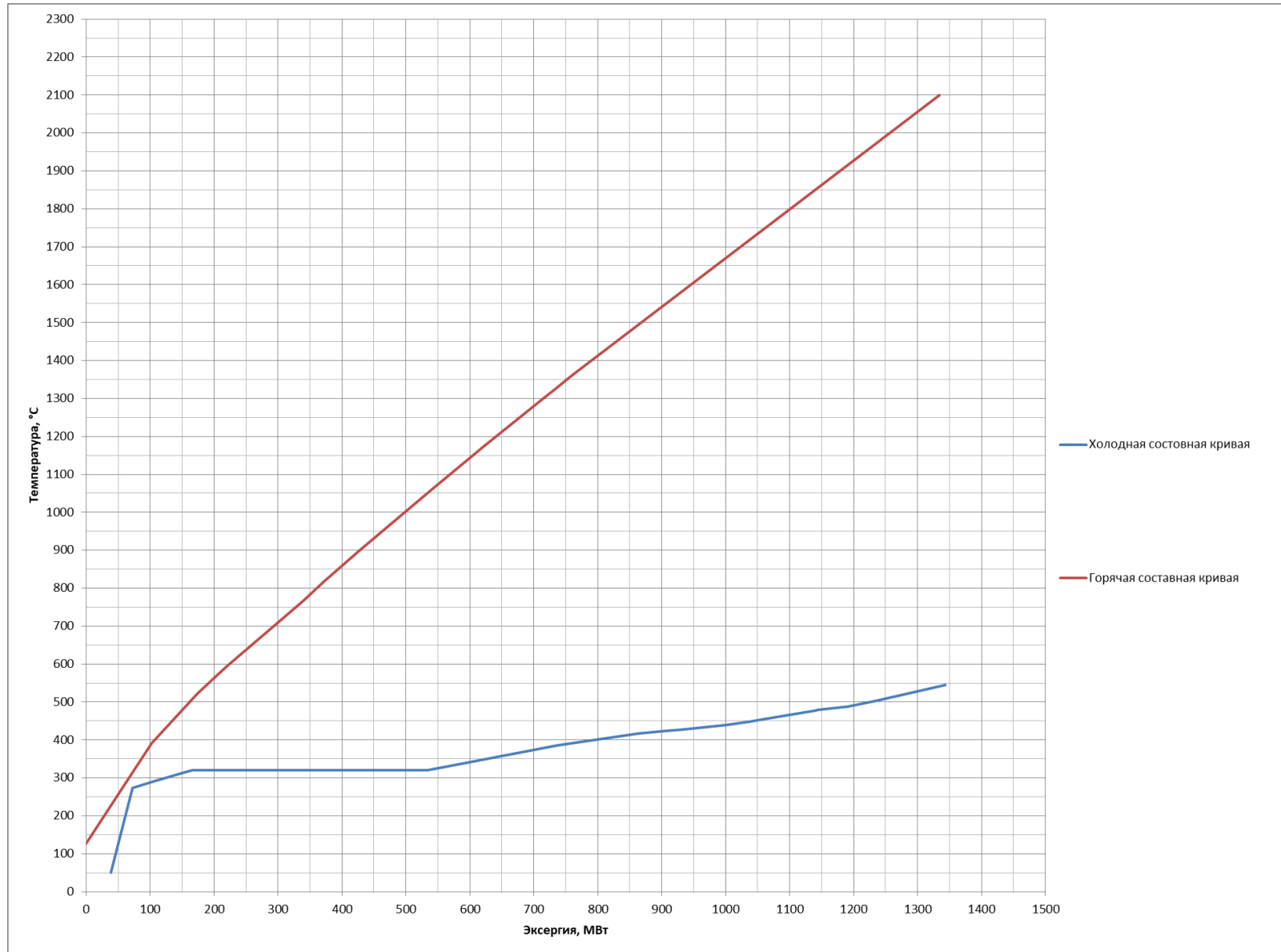


Рисунок 4.13 – Составные кривые в системе координат «эксергия – температура»

Структурная оптимизация котельного агрегата эксергетическим пинч-анализом представлена в Приложение Ж.

Для оптимизации схемы теплообмена котельного агрегата необходимо внести изменения:

- 1) Анализируя схему, делаем вывод, что ниже точки пинча остается 38 МВт. Таким образом, мы можем оптимизировать котельный агрегат, используя эти 38 МВт эксергии. Ниже точки пинча холодным потоком является воздух в воздухоподогревателе, следовательно, при оптимизации тепловых процессов можно увеличить площадь поверхности нагрева воздухоподогревателя.
- 2) Пар в выходной ступени конвективного пароперегревателя дополнительно нагревается уходящими газами в подвесных трубах;
- 3) Пар в экранах стенки и пода горизонтального газохода дополнительно нагревается:
  - до 394,5°С уходящими газами в экранах потолка топки, горизонтального газохода, поворотной камеры (8 МВт);
  - до 410°С уходящими газами промежуточной ступени вторичного пароперегревателя (49 МВт);
  - до 420°С уходящими газами воздухоподогревателя (26 МВт).

Рассчитаем эксергию топлива для выбранного котла по формуле (1.15). Топливо – мазут, с вышей теплотворной способностью  $Q_v = 42,98 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$ , расход составляет 51 кг/с.

$$E_{\text{топлива}} = 0,975 \cdot 42,98 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}} \cdot 51 \frac{\text{кг}}{\text{с}} = 2135,7 \text{ МВт.}$$

Котельному агрегату было передано 2135,7 МВт эксергии топлива, но горячие потоки отдали 1414,19 МВт эксергии. Следовательно, потери эксергии топлива составляют 33,78 %. Это предопределяет необходимость поиска путей по снижению потерь эксергии топлива в данном виде теплоэнергетического оборудования и конкретном котлоагрегате.



#### 4.4 Выводы по главе 4

В первой части четвертой главы был проведен анализ энергоэффективности существующей установки первичной перегонки нефти в результате, которого было выявлено, что система теплообмена не оптимальна.

Проведена структурная и параметрическая оптимизация установки первичной перегонки нефти традиционным и эксергетическим пинч-анализом. Эксергетический пинч-анализ показал свое преимущество:

1. При традиционном пинч-анализе количество теплообменников необходимо больше, чем при эксергетическом. Таким образом, эксергетический пинч-анализ экономически выгоднее.

2. Эксергетический пинч-анализ позволяет привести к минимуму потери эксергии. Традиционный пинч-анализ не учитывает эксергию, тем самым игнорирует потенциал тепловой энергии.

3. В установке ЭЛОУ АТ-6 нефть перед колонной 2 нуждается во внешнем источнике тепла, который дает 34,18 МВт эксергии. После оптимизации системы теплообмена установки первичной переработки нефти, для совершения процессов достаточно 12 МВт эксергии от горячего внешнего энергоносителя. Печи в установке ЭЛОУ АТ-6 Т-1А и Т-1Б дают 23,21 МВт эксергии и 23,29 МВт эксергии, соответственно. Эксергия рекуперация печи Т-1Б 17,86 МВт, этого количества эксергии достаточно для того чтобы обеспечить тепловой баланс установки ЭЛОУ АТ- 6 после оптимизации. Следовательно, можно оставить одну печь.

Во второй части четвертой главы проведена оптимизация внешнего источника тепловой энергии: печи установки ЭЛОУ-АТ-6. Также для сравнения двух методов, проведены традиционный и эксергетический пинч-анализ. Традиционный пинч-анализ не дает предложений по уменьшению потерь эксергии. Эксергетический пинч-анализ показывает, что необходимо уменьшать потери в радиантной секции печи.

В третьей части четвертой главы проведена структурная и параметрическая оптимизация внешнего источника тепловой энергии – котельного агрегата. Эксергетический пинч-анализ позволил выявить неиспользуемую эксергию и определить, в какой части происходят потери [110, 88].

## 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.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

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 построении 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агапов, Д.А. Структурная и параметрическая оптимизация систем промышленного теплотехнического и технологического оборудования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.04/ Агапов Дмитрий Станиславович. – СПб., 2017. – 312 с.
2. Агапов, Д.С. Концепция термодинамического совершенствования энергоустановок. / Д. С. Агапов // Известия СПбГАУ, 2011 г. – №23. – С. 367–371.
3. Агапов, Д.С. Эксергетическая функция теплоты и термический КПД энергоустановок при переменной температуре/Д.С. Агапов// Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2011. – № 24. – С. 322-325
4. Александров, И.А. Перегонка и ректификация в нефтепереработке/ И.А. Александров. – М.: Химия, 1981. – 352 с.
5. Анализ системы теплообмена на примере установки ЭЛОУ-АТ-6. URL: <https://knowledge.allbest.ru/manufacture/2c0b65635a2ac69a4c53a88521206c26.html> (дата обращения: 11.12.2019). – Текст: электронный.
6. Андриященко, А.И. О применении эксергии для анализа совершенства и оптимизации теплоэнергетических установок/ А.И. Андриященко// Теплоэнергетика. – 1989. – №4. – С. 59-63.
7. Ахметов С.А. Физико-химическая технология глубокой переработки нефти. Учебное пособие - Ч.1./ С.А. Ахметов. - Уфа: УГНТУ, 1996. - 279 с.
8. Бабкин, В.А. Снижение энергоёмкости и повышение энергоэффективности объектов ТЭК /В.А. Бабкин// Энергетик. – 2018. – №8. – С. 44-48.
9. Багдасаров, Л.Н. Популярная нефтепереработка/ И.А. Александров. – М.: ООО «ЦСП «Платформа», 2017. – 102 с.
10. Баннов П.Г. Процессы переработки нефти/ Баннов П.Г. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 2000. – 224 с.
11. Барочкин, Е. В. Анализ и оптимальный синтез теплообменных систем со сложной конфигурацией потоков в энергетических и химических комплексах: дис. ... док. канд. тех. наук: 05.13.01 / Евгений Витальевич Барочкин. – Иваново, 2008. – 309 с.
12. Баторшин, В. ТЭЦ на нефтезаводском газе /В. Баторшин// Промышленные и отопительные котельные и мини-ТЭЦ. – 2015. – №2/29. – С. 30-31.
13. Башмаков, И.А. Повышение энергоэффективности в российской промышленности. Что делать! / И.А. Башмаков// Энергосовет, 2013. № 3 (28). С.41-56.

14. Богданов, А. Б. Экономика энергетики с применением эксергии и анергии/А.Б. Богданов, О.А. Богданова// НИГРЭ. – 2015. –Т.ХІ(18). – С. 41-53 – URL: <http://exergy.narod.ru/Nigre2015-11.PDF> (дата обращения: 11.12.2018).
15. Боровков, В. М. Эксергетический анализ тепловой схемы индивидуального теплового пункта на стадии проектирования/ В.М. Боровков, С.В. Скулкин// Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2010. – №3 (106). – С. 61-66.
16. Бродянский В.М. Эксергетические расчёты технических систем: справ. пособие/ Бродянский В. М., Верхивкер Г. П., Карчев Я. Я. и др.: Под ред. Долинского А. А., Бродянского В. М. // АН УССР. Ин-т технической теплофизики. Киев: Наук. думка, 1991. – 360 с. – ISBN 5-12-001397-X.
17. Бродянский В.М. Эксергетический метод и его приложения/ В.М. Бродянский. – Москва: Мир, 1967. – 248 с.
18. Бродянский, В.М. Эксергетический метод и его приложения/ В.М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек; Под ред. В.М. Бродянского. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
19. Бродянский, В.М. Энергия: проблема качества. / В.М. Бродянский // Журнал "Наука и Жизнь", 1982. – №3. – С. 88–95.
20. Василенко, В.В. Основные источники потерь в тепловых системах и способы их устранения / В.В. Василенко, Н.В. Букаров// Известия Ростовского государственного строительного университета. – 2010. – Т.1. – № 14. – С.134-139.
21. Галковский, В.А. Оптимизация энергосберегающих теплотехнических систем/ дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04 / Вадим Анатольевич. – М., 2002. – 183 с.
22. Генеральная схема развития нефтяной отрасли Российской Федерации на период до 2020 года. – URL: <https://pandia.ru/text/77/358/71428.php> (дата обращения: 05.02.2020). – Текст: электронный.
23. Гоголева, Л.В. Необходимость применения методики solomon для оценки эффективности функционирования предприятий нефтегазохимического комплекса/ Л.В. Гоголева// Успехи в химии и химической технологии. – 2013. – №27 (9). – С. 103-107.
24. Государственная программа российской федерации «Развитие энергетики» . – URL: <https://minenergo.gov.ru/node/323> (дата обращения: 09.11.2019). – Текст: электронный.
25. Гохштейн Д.П. Энтропийный метод расчета энергетических потерь/ Д.П. Гохштейн. - М.-Л.: ГЭИ., 1963. - 112 с.
26. Гохштейн, Д.П. Современные методы термодинамического анализа энергетических установок. / Д.П. Гохштейн// – Москва: Энергия; 1969. – 368 с.
27. Енин, В. И. Судовые котельные установки: Учеб. для вузов/ В.И. Енин, Н.И. Денисенко, И.И. Костылев; М.: Транспорт, 1993. 216 с.

28. Ентус, Н.Р. Трубчатые печи в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности/ Н.Р. Ентус, В.В. Шарихин. – М.: Химия, 1987. – 304 с.
29. Зильберглейт, М. А. Моделирование и оптимизация процесса интеграции тепловых потоков в среде Hint Heatintegration/ М.А. Зильберглейт, М.О. Шевчук// Труды БГТУ. – 2018. – №2. – С. 16-24.
30. Ивель В.П. Принципы построения цифро-аналоговых преобразователей для многопараметрических систем управления на базе платформы arduino mega 2560/ В.П. Ивель, Ю.В. Герасимова// Наука и мир. – 2015. – №10 (26) . – С. 73-75.
31. Ипатов, В.Б. Эксергетический анализ теплоэнергетического оборудования и определение тарифов в АО «Дальэнерго»: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04/ Ипатов Виктор Борисович. – Владивосток, 1999. – 286 с.
32. Казаков, В.Г. Эксергетические методы оценки эффективности теплотехнологических установок: учебное пособие. СПбГТУРП/ В.Г. Казаков, П.В. Луканин, О.С. Смирнова// – Санкт-Петербург. – 2013. – 93 с.
33. Клемеш, Й. Применение метода пинч-анализа для проектирования энергосберегающих установок нефтепереработки/ Й. Клемеш, Ю.Т. Костенко, Л.Л. Тобажнянский, П.А. Капустенко, Л.М. Ульев, А.Ю. Перевертайленко, Б.Д. Зулин// ТОХТ. - 1999. – 33 (4). С. 420 – 431.
34. Кривда, В.И. Проект-реконструкция теплообменных аппаратов и линий их подсоединения установки элоу-авт методом пинч-анализа/ В. И. Кривда, М. В. Максимов// Сборник научных трудов Sworld. – 2011. – Т.2. – № 2. – С. 85-96.
35. Ларин, А.П. Анализ эффективности использования технологического газа нефтепереработки на ТЭЦ промышленного предприятия / А.П. Ларин, С.К. Зиганшина// Экологический сборник 7: Труды молодых ученых. Всероссийская (с международным участием) молодежная научная конференция. – 2019. – №1. – С. 290-294. doi:10.24411/9999-010A-2019-10072
36. Лебедев, В.А. Эксергетический метод как методологическая основа оценки энергоэффективности теплоэнергетических систем/ В.А. Лебедев, Е.А. Юшкова// Сборник трудов: I Всероссийская научная конференция «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса». – 2017. – С. 172-178.
37. Лебедев, В.А. Эксергетический метод оценки энергоэффективности оборудования систем энергообеспечения предприятий минерально-сырьевого комплекса/ В.А. Лебедев// Записки Горного института. – 2016. – Т.219. – С.435–443. DOI 10.18454/PMI.2016.3.435.
38. Левин, И.А. Оптимизация эффективности работы производственных активов НПЗ / И.А. Левин, Р.В. Виноградов, П.А. Чернявский// Нефть. Газ. Иновации. – 2019. – №8 (225). – С. 44-47.

39. Леффер, У.Л. Переработка нефти/ У.Л. Леффер. – 2-е изд. – М.: Олимп-Бизнес, 2019. – 224 с.
40. Липов, Ю.М. Компонировка и тепловой расчет парового котла/ Ю.М. Липов, Ю.Ф. Самойлов, Т.В. Виленский. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 208 с.
41. Лисицин, Н.В. Викторов В.К. Кузичкин Н.В. Химико-технологические системы: оптимизация и ресурсосбережение/ Н.В. Лисицин, В.К. Викторов, Н.В. Кузичкин. – СПб: Менделеев, 2007. – 312 с.
42. Мановян, А.К. Технология переработки нефти и природного газа: учебное пособие для вузов, 2-е изд./ А.К. Мановян. – М.: Химия, 2001. – 568 с.
43. Мартынов, А.В. Определение энергетической эффективности аппаратов, установок и систем/ А.В. Мартынов// Новости теплоснабжения. – 2010. – №10 (122). – С. 17-19.
44. Марфин, Е.А. Повышение энергетической эффективности теплотехнологических систем предприятий нефтяной промышленности: дис. ... канд. тех. наук: 05.14.04 / Евгений Александрович Марфин. – Казань, 2006. – 147 с.
45. Мешалкин, В. П. Энергоресурсоэффективная реконструкция установки нефтепереработки на основе пинч-анализа с учётом внешних тепловых потерь / В. П. Мешалкин, Л. Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, Л. М. Ульев, Л. А. Мельниковская, С. М. Ходченко // Теоретические основы химической технологии. – 2012. – Т. 46. – №5. – С. 491–500.
46. Миркин А.З. Энергосбережение на НПЗ / А.З. Миркин, Г.С. Яицких, А.В. Краснов, В.Г. Яицких// Oil&Gas Journal Russia. – 2013. – № 11 (77). – С. 72-75.
47. Мощный микроконтроллер Arduino Mega 2560. – URL: <https://arduinoplus.ru/arduino-mega2560/> (дата обращения: 15.01.2020). – Текст: электронный.
48. Муслина Д.Б. К вопросу о применении пинч-анализа для повышения эффективности использования тепловой энергии / Д.Б. Муслина, Е.Г. Бойко, Т.В. Бубырь// Вестник Луганского Национального Университета имени Владимира Даля. – 2017. – №1-1 (3). – С. 98-102.
49. На какие фракции делится нефть. – URL: <https://neftregion.ru/informaciya/na-kakie-frakcii-delitsya-neft> (дата обращения: 17.02.2020). – Текст: электронный.
50. Недосекин, А.О. Стратегический подход к оценке экономической устойчивости объектов минерально-сырьевого комплекса/ А.О. Недосекин, Е.И. Рейшахрит, А.Н. Козловский// Записки горного института. – 2019. – №237. – С. 354-360.
51. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федер. закон №261-ФЗ от 23.11.2009.
52. Основные источники потерь в тепловых системах и способы их устранения. – URL: <http://www.energsovet.ru/stat11.html> (дата обращения: 05.02.2020). – Текст: электронный.

53. 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.
54. Петкова П. Г. Использование индексов Solomon и Нельсона для анализа эффективности нефтеперерабатывающих предприятий/ П.Г. Петкова// Проблемы геологии и освоения недр: труды XX Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. – 2016. – С. 1065-1066.
55. Рейтинг стран по добыче нефти в 2019 году составлен экспертами нефтяной статистики.. – URL: <https://news.myseldon.com/ru/news/index/210552357> (дата обращения: 05.02.2020). – Текст: электронный.
56. Рейшахрит, Е.И. Особенности управления энергоэффективностью на предприятиях нефтеперерабатывающей отрасли / Е.И. Рейшахрит// Записки Горного института. –2016. – № 219. – С. 490-497.
57. Ривкин, СЛ. Теплофизические свойства воды и водяного пара/ С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М.: Энергия, 1980. – 424 с.
58. Рогалев М.С. Описание, анализ технологической схемы и пусконаладочных работ установки ЭЛОУ-АТ Антипинского нефтеперерабатывающего завода/ М.С. Рогалев // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2007. – №4. – С. 81-85.
59. Ромашова, О.Ю. Тема 3.Эксергетический анализ теплосиловых установок. Курс лекций: Эксергетический анализ и технико-экономическое обоснование технологий преобразования энергии/О.Ю. Ромашова; Томский политехнический университет. Томск, 2018. – URL: [https://portal.tpu.ru/SHARED/r/ROMA/education/Tab8/Lecture\\_3.pdf](https://portal.tpu.ru/SHARED/r/ROMA/education/Tab8/Lecture_3.pdf) (дата обращения: 05.02.2020). – Текст: электронный.
60. Руководство по эксплуатации Water Flow sensor G 1/2. – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/583/DOC000583441.pdf> (дата обращения: 05.02.2020). – Текст: электронный.
61. Руководство по эксплуатации: Тепловычислители СПТ941. АО НПФ ЛОГИКА. 2014 г. – 88 с.
62. Савченко, А. Л. Первичная переработка нефти и газа: учебное пособие/А. Л. Савченков. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2014. – 128 с.



63. Сажин, Б.С. Эксергетический анализ работы промышленных установок/ Б.С. Сажин, А.П. Булеков, В.С. Сажин. – Москва, 2000. – 297 с.
64. Сажин, Б.С. Эксергетический метод в химической технологии/ Б.С. Сажин, А.П. Булеков; М., Химия, 1992. – 208 с.
65. Сетин, С.П. Системный анализ и управление процессами первичной переработки нефти: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.01/ Сергей Петрович. – Самара, 2016. – 203 с.
66. Смит, Р. Основы интеграции тепловых процессов/ Р. Смит, Й. Клемеш, Л.Л. Товажнянский; – Харьков: НТУ «ХПИ», 2000. – 458 с.
67. Справочный документ по наилучшим доступным технологиям энергоэффективности. - 2009. – URL: <http://portal-energo.ru/articles/details/id/626> (дата обращения: 05.02.2020). – Текст: электронный.
68. Степанов, В.С. Расчет химической энергии и эксергии технических топлив/ В.С. Степанов, Т.Б. Степанова// Известия академии наук. Энергетика. – 1994. – №1. – С. 106-115.
69. Степанов, В.С. Химическая энергия и эксергия веществ/ В.С. Степанов. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1985. – 104 с.
70. Степанов, В.С. Энергетические характеристики топлив и способы их определения/ В.С. Степанов, Т.Б. Степанова, Н.В. Стариков// Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2016. – № (7-8). – С. 34-44.
71. Тенденции российской нефтеперерабатывающей отрасли.. – URL: [http://www.cdu.ru/tek\\_russia/articles/2/556/](http://www.cdu.ru/tek_russia/articles/2/556/) (дата обращения: 05.02.2020). – Текст: электронный.
72. Трубчатые печи: конструкция и характеристики.. – URL: <https://pronpz.ru/pechi/konstruktiv.html> (дата обращения: 05.02.2020). – Текст: электронный.
73. Хидиятуллин, А.С. Пинч-анализ схемы установки первичной переработки нефти / А.С. Хидиятуллин, И.В. Гареева, Н.А. Руднев// Электронный научный журнал нефтегазовое дело. – 2016. – №3. – С. 183-197.
74. Хусаинова, Е. К. Совершенствование подхода к оценке эффективности энергосберегающих проектов в нефтеперерабатывающей отрасли / Е. К. Хусаинова, Е. И. Рейшахрит// Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного Политехнического Университета. Экономические науки, 2015. – №2 (216). – С. 76-84.
75. Шаргут, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела; Пер. с польск.; Под ред. В.М. Бродянского. – Москва: Энергия; 1968. – 280 с.
76. Шперук, Л. М. Пинч-анализ как инструмент достижения энергоэффективности/ Л.М. Шперук// Успехи в химии и химической технологии. – 2018. – №8 (204). – С. 12-14.

77. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года.. – URL: [http://www.energystrategy.ru/ab\\_ins/source/ES-2035\\_09\\_2015.pdf](http://www.energystrategy.ru/ab_ins/source/ES-2035_09_2015.pdf) (дата обращения: 15.01.2020). – Текст: электронный.
78. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в ТЭК. – URL: <https://www.tyuiu.ru/wp-content/uploads/2019/03/Energoberezhenie-i-povyshenie-energeticheskoy-effektivnosti-v-TEK.pdf> (дата обращения: 05.02.2020). – Текст: электронный.
79. Юшкова, Е.А. Определение эксергии в теплотехнических системах/Е.А. Юшкова// Сборник избранных статей по материалам международной научной конференции "Наука. Исследования. Практика". – Санкт-Петербург: ГНИИ «Нацразвитие». – 2020 – С. 184-186
80. Юшкова, Е.А. Потoki энергии и эксергии/ Е.А. Юшкова, В.А. Лебедев// Молодой ученый. – 2017. – №12 (146) – С. 106-109.
81. 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.
82. Юшкова, Е.А. Эксергетический метод анализа теплоэнергетических систем/ Е.А. Юшкова// Сборник материалов: «XXX международной научно-практической конференции «Достижения вузовской науки»», Новосибирск: ЦРНС. – 2017. – С. 82-86.
83. 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.
84. Ягудин, М.Н. Трубчатые печи. Расчеты при проектировании/ М.Н. Ягудин.– Уфа: ГУП ИНХП РБ, 2014. – 256 с.
85. Ahmadi, P. Thermodynamic and exergoenvironmental analyses, and multi-objective optimization of a gas turbine power plant/ P. Ahmadi, I. Dincer// Applied Thermal Engineering – 2011. – №31. pp. 2529–2540.
86. Asl, S.S. Energy benchmarking of thermal power plants using pinch analysis/ S. S. Asl, N. Tahouni, M. H. Panjeshahi// Journal of cleaner production. – 2018. – №171. – pp. 1342-1352.
87. AspenTech – HYSYS. Модульные операции, 2006. –752 с.
88. Bilgen, E., Exergetic and engineering analyses of gas turbine based cogeneration systems/E. Bilgen// Energy. – 2000. – Vol.25. – pp. 1215-1229.
89. Chehade, G., Dincer, I. Exergy analysis and assessment of a new integrated industrial based energy system for power, steam and ammonia production/ G. Chehade, I. Dincer// Energy. – 2019. –pp. 110-120. DOI:10.1016/J.ENERGY.2019.116277.

90. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/246/DOC004246203.pdf> (дата обращения: 05.03.2020). – Текст: электронный.
91. Kemp, Ian C. Pinch analysis and process integration. A user guide on process integration for the efficient use of energy (2nd Ed.) / Ian C. Kemp. – Butterworth-Heinemann: Oxford, 2007. – 415 p.
92. 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. – p. 00001.
93. 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.
94. 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.
95. Li, B.H. An improved design method for retrofitting industrial heat exchanger networks based on Pinch Analysis / B. H. Li, Ya. E. Chota Castillo, C. T. Chang// Chemical Engineering Research and Design. – 2019. – Volume 148. – pp. 260–270. DOI:10.1016/J.CHERD.2019.06.008.
96. Linhoff, B. The use of pinch analysis to knock down capital costs and emissions / B. Linhoff// Chemical Engineering Progress. – 1994. – pp. 32–57.
97. Linnhoff, B. Pinch analysis – a state-of-the-art overview Chemical Engineering Research and Design. –1993. – Volume 71:A5. – pp. 503-522.
98. Lozano, M. Theory of the exergetic cost/ M. Lozano, A. Valero// Energy. – 1993. – Vol.18. – №9. – pp. 939–960.
99. Moran, M. Exergy analysis: principles and practice / M. Moran, E. Sciubba// Gas Turbines Power. – 1994. – Vol.116. – №2. pp. 285–290.
100. Morosuk, T. Splitting physical exergy: Theory and application/ T. Morosuk, G. Tsatsaronis; Energy. – 2019. – no 167. pp. 698–707. DOI:10.1016/J.ENERGY.2018.10.090.
101. Nordman, R. New pinch technology based HEN analysis methodologies for cost-effective retrofitting/ R. Nordman, T. Berntsson// Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2001. – №79(4). – pp. 655–662.
102. Rashidi, J. Exergy, exergo-economic, and exergy-pinch analyses (EXPA) of the kalina power-cooling cycle with an ejector/ J. Rashidi, C. Yoo// Energy. – 2018. – no.155. – pp. 504–520. DOI:10.1016/J.ENERGY.2018.04.178.
103. Salama A. I. Numerical techniques for determining heat energy targets in pinch analysis /A. I.Salama// Computers & Chemical Engineering. – 2005. – №29 (8). – pp. 1861–1866.
104. Smith, R. Chemical Process Design/R. Smith. - N.Y.: McGraw-Hill, 1995. – P.460.

105. Staine F. Energy integration of industrial processes based on the pinch analysis method extended to include exergy factors/ F. Staine, D. Favrat// *Applied Thermal Engineering*. – 1996. – №16(6). – pp. 497–507.
106. TFT touch LCD shield. – URL: <https://roboshop.spb.ru/display/ILI9325-28-touch-shield> (дата обращения: 05.02.2020). – Текст: электронный.
107. Trinklein, E.H. Modeling optimization, and control of ship energy systems using exergy methods/ E.H. Trinklein, G.G. Parker, T.J. McCoy// *Energy*. – 2019. – pp. 116-118.. DOI:10.1016/J.ENERGY.2019.116542.
108. Tsatsaronis, G. On avoidable and unavoidable exergy destructions and investment costs in thermal systems/ G. Tsatsaronis, P. Moungh-Ho// *Energy Conversion Management*. – 2002. – Volume 43. – pp. 1259-1270.
109. 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.
110. 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.
111. Yushkova, E.A. Exergetic method of analysis of thermal power systems/ E.A. Yushkova// *International University of Resources. Scientific Reports on Resource Issues*. – 2017. – Vol. 1. – С. 457-461.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Исходные данные и рассчитанное по ним количество теплоты и эксергии

Таблица А.1 – Исходные данные и рассчитанное по ним количество теплоты и эксергии.

Дата	Т <sub>вх</sub> , °С	Т <sub>вых</sub> , °С	Т <sub>вх</sub> , К	Т <sub>вых</sub> , К	Q, кДж	E, кДж	Q, Гкал	E, Гкал	Ch, кДж/(кг*К)	Расход, кг	T окр.ср, °С	T окр.ср, К
28.02.17	81,037	47,763	354,037	320,763	6963573	808181,5	1,664294	0,193155	4,196	49876	25	298
27.02.17	82,687	48,053	355,687	321,053	7182797	851428,4	1,716689	0,203491	4,196	49426	25	298
26.02.17	82,747	47,85	355,747	320,85	7161052	847430,1	1,711491	0,202536	4,196	48905	25	298
25.02.17	81,397	47,073	354,397	320,073	7001127	809184,4	1,673269	0,193395	4,196	48611	25	298
24.02.17	80,259	47,064	353,259	320,064	6774464	773099,9	1,619097	0,184771	4,196	48637	25	298
23.02.17	80,435	46,989	353,435	319,989	6805620	777486,8	1,626543	0,185819	4,196	48494	25	298
22.02.17	78,836	46,305	351,836	319,305	6584354	732599,1	1,573661	0,175091	4,196	48237	25	298
21.02.17	78,01	46,575	351,01	319,575	6476088	716073,4	1,547785	0,171142	4,196	49098	25	298
20.02.17	78,185	47,067	351,185	320,067	6517850	726545,1	1,557766	0,173644	4,196	49918	25	298
19.02.17	78,48	46,989	351,48	319,989	6621215	739869,4	1,58247	0,176829	4,196	50109	25	298
18.02.17	78	46,755	351	319,755	6558741	726744,7	1,567539	0,173692	4,196	50027	25	298
17.02.17	79,376	47,667	352,376	320,667	6765508	770006,9	1,616957	0,184032	4,196	50849	25	298
16.02.17	80,577	47,71	353,577	320,71	6893428	795517,9	1,647529	0,190129	4,196	49985	25	298
15.02.17	82,424	50,493	355,424	323,493	7520838	913654,9	1,79748	0,218364	4,196	56133	25	298
14.02.17	84,973	52,421	357,973	325,421	8059659	1025365	1,926259	0,245062	4,196	59007	25	298
13.02.17	87,208	52,888	360,208	325,888	8454923	1104139	2,020726	0,263889	4,196	58712	25	298
12.02.17	87,942	52,551	360,942	325,551	8612740	1128690	2,058445	0,269757	4,196	57998	25	298
11.02.17	88,315	52,943	361,315	325,943	8668672	1144427	2,071813	0,273518	4,196	58406	25	298
10.02.17	88,892	52,614	361,892	325,614	8715651	1153015	2,083041	0,275571	4,196	57256	25	298
09.02.17	87,834	51,648	360,834	324,648	8537764	1107602	2,040526	0,264717	4,196	56230	25	298

Продолжение таблицы А.1

08.02.17	88,898	52,187	361,898	325,187	8767612	1155049	2,095459	0,276057	4,196	56918	25	298
07.02.17	87,125	51,105	360,125	324,105	8467161	1084998	2,023651	0,259314	4,196	56022	25	298
06.02.17	84,351	50,727	357,351	323,727	7990987	992518,1	1,909846	0,237212	4,196	56639	25	298
05.02.17	83	51,134	356	324,134	7743131	952870	1,850608	0,227736	4,196	57910	25	298
04.02.17	81,76	50,689	354,76	323,689	7585154	917126,9	1,812852	0,219193	4,196	58180	25	298
03.02.17	79,936	49,298	352,936	322,298	7263987	847972,8	1,736093	0,202665	4,196	56504	25	298
02.02.17	78,1	48,269	351,1	321,269	6989291	789787,6	1,670441	0,188759	4,196	55838	25	298
01.02.17	78,338	48,912	351,338	321,912	7089363	809446,2	1,694358	0,193458	4,196	57417	25	298
31.01.17	78,137	48,993	351,137	321,993	7049060	803805,9	1,684725	0,19211	4,196	57643	25	298
30.01.17	78,964	49,319	351,964	322,319	7147349	825718,7	1,708216	0,197347	4,196	57459	25	298
29.01.17	79,878	49,467	352,878	322,467	7216038	843488,9	1,724633	0,201594	4,196	56550	25	298
28.01.17	80,354	50,057	353,354	323,057	7375990	872498,2	1,762862	0,208527	4,196	58021	25	298
27.01.17	79,896	49,893	352,896	322,893	7369374	865811,4	1,76128	0,206929	4,196	58537	25	298
26.01.17	78,582	48,692	351,582	321,692	7228492	825430,3	1,72761	0,197278	4,196	57635	25	298
25.01.17	79,007	49,098	352,007	322,098	7289310	840340	1,742145	0,200841	4,196	58083	25	298
24.01.17	79,721	50,343	352,721	323,343	7404711	872801,7	1,769726	0,2086	4,196	60069	25	298
23.01.17	81,581	51,967	354,581	324,967	7763289	950153,5	1,855426	0,227087	4,196	62476	25	298
22.01.17	81,859	52,26	354,859	325,26	7977323	982238,9	1,90658	0,234755	4,196	64231	25	298
21.01.17	81,369	52,054	354,369	325,054	7886882	964093,3	1,884965	0,230418	4,196	64118	25	298
20.01.17	81,597	52,258	354,597	325,258	7907373	971006,9	1,889862	0,232071	4,196	64232	25	298
19.01.17	81,467	52,221	354,467	325,221	7953361	974965,2	1,900853	0,233017	4,196	64811	25	298
18.01.17	80,774	51,039	353,774	324,039	7823082	939839,4	1,869717	0,224622	4,196	62701	25	298
17.01.17	81,998	49,886	354,998	322,886	7662910	920583,6	1,831435	0,220019	4,196	56871	25	298
16.01.17	81,385	49,803	354,385	322,803	7606140	907039,6	1,817867	0,216782	4,196	57397	25	298
15.01.17	83,122	50,6	356,122	323,6	7834711	959759,4	1,872496	0,229382	4,196	57413	25	298
14.01.17	83,396	50,611	356,396	323,611	7938376	975296	1,897272	0,233096	4,196	57706	25	298

Продолжение таблицы А.1

13.01.17	83,472	50,317	356,472	323,317	8041738	985604,9	1,921975	0,23556	4,196	57805	25	298
12.01.17	82,758	49,767	355,758	322,767	8053041	973861,8	1,924677	0,232753	4,196	58174	25	298
11.01.17	84,295	50,491	357,295	323,491	8311349	1029118	1,986413	0,245959	4,196	58596	25	298
10.01.17	86,857	50,327	359,857	323,327	8523434	1080613	2,037101	0,258266	4,196	55607	25	298
09.01.17	90,3	49,275	363,3	322,275	8652834	1121553	2,068027	0,268051	4,196	50266	25	298
08.01.17	91,72	48,676	364,72	321,676	8974099	1171619	2,14481	0,280017	4,196	49687	25	298
07.01.17	90,454	47,864	363,454	320,864	8908040	1139630	2,129021	0,272372	4,196	49847	25	298
06.01.17	87,917	48,269	360,917	321,269	8674833	1087410	2,073285	0,259891	4,196	52144	25	298
05.01.17	84,179	45,816	357,179	318,816	7724522	906768,9	1,846161	0,216718	4,196	47987	25	298
04.01.17	80,771	45,406	353,771	318,406	7068779	795303,4	1,689438	0,190078	4,196	47636	25	298
03.01.17	77,608	46,179	350,608	319,179	6757331	740001,4	1,615002	0,17686	4,196	51240	25	298
02.01.17	74,855	45,092	347,855	318,092	6196946	647192,2	1,48107	0,154679	4,196	49621	25	298
01.01.17	73,979	45,087	346,979	318,087	5990379	618710	1,431701	0,147872	4,196	49413	25	298

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
**Патент на изобретение**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2702701

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭКСЕРГИИ РАБОЧЕЙ  
СРЕДЫ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования "Санкт-  
Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Лебедев Владимир Александрович (RU),  
Юшкова Екатерина Александровна (RU)*

Заявка № 2019105328  
Приоритет изобретения 26 ноября 2018 г.  
Дата государственной регистрации в  
Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации 09 октября 2019 г.  
Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 26 ноября 2038 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ишнев* Г.П. Ишнев





**ПРИЛОЖЕНИЕ В****Диплом «Архимед 2020»**

XXIII Московский международный  
Салон изобретений и инновационных технологий



**«АРХИМЕД 2020»**

*ДИПЛОМ*

*Решением Международного Жюри  
награждается*

**СЕРЕБРЯНОЙ МЕДАЛЬЮ**

*Федеральное Государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский  
горный университет»  
авторы: Юшкова Е.А., Лебедев В.А.  
за проект: «Устройство для измерения эксергии рабочей среды»*

Председатель  
Международного Жюри,  
академик,  
член президиума РАН

**С.М. Алдошин**

Президент Салона

**Д.И. Зезюлин**

Руководитель  
Федеральной службы  
по интеллектуальной  
собственности

**Г.П. Ивлиев**

*Россия, Москва, 24.03 - 27.03.2020 г.*

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Данные показаний устройства для измерения эксергии

Таблица Г.1 – Данные показаний устройства для измерения эксергии

Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 287.13 K, T2 = 286.25 K
Q = 122.50 J/sec E = 0.88 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 287.19 K, T2 = 286.25 K
Q = 131.25 J/sec E = 0.96 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 287.25 K, T2 = 286.38 K
Q = 122.50 J/sec E = 0.93 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 287.38 K, T2 = 286.44 K
Q = 131.25 J/sec E = 1.07 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 287.50 K, T2 = 286.56 K
Q = 131.25 J/sec E = 1.10 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 287.63 K, T2 = 286.63 K
Q = 140.00 J/sec E = 1.22 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 287.69 K, T2 = 286.75 K
Q = 131.25 J/sec E = 1.21 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 287.81 K, T2 = 286.81 K
Q = 140.00 J/sec E = 1.34 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 287.94 K, T2 = 286.94 K
Q = 140.00 J/sec E = 1.40 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 288.00 K, T2 = 287.06 K
Q = 131.25 J/sec E = 1.35 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 288.19 K, T2 = 287.19 K
Q = 140.00 J/sec E = 1.52 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 288.25 K, T2 = 287.25 K
Q = 140.00 J/sec E = 1.55 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 288.38 K, T2 = 287.44 K
Q = 131.25 J/sec E = 1.52 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 288.56 K, T2 = 287.44 K
Q = 157.50 J/sec E = 1.88 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 288.69 K, T2 = 287.63 K
Q = 148.75 J/sec E = 1.89 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 288.81 K, T2 = 287.75 K
Q = 148.75 J/sec E = 1.95 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 289.00 K, T2 = 287.88 K
Q = 157.50 J/sec E = 2.12 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 289.06 K, T2 = 288.00 K
Q = 148.75 J/sec E = 2.04 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 289.19 K, T2 = 288.19 K

Продолжение таблицы Г.1

Q = 140.00 J/sec E = 2.00 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 289.38 K, T2 = 288.25 K
Q = 157.50 J/sec E = 2.35 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 289.38 K, T2 = 288.38 K
Q = 140.00 J/sec E = 2.06 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 289.69 K, T2 = 288.50 K
Q = 166.25 J/sec E = 2.61 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 289.81 K, T2 = 288.63 K
Q = 166.25 J/sec E = 2.67 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 289.94 K, T2 = 288.69 K
Q = 175.00 J/sec E = 2.84 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 290.06 K, T2 = 288.88 K
Q = 166.25 J/sec E = 2.78 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 290.19 K, T2 = 289.00 K
Q = 166.25 J/sec E = 2.85 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 290.38 K, T2 = 289.06 K
Q = 183.75 J/sec E = 3.23 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 290.38 K, T2 = 289.13 K
Q = 175.00 J/sec E = 3.10 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 290.63 K, T2 = 289.19 K
Q = 201.25 J/sec E = 3.67 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 290.69 K, T2 = 289.31 K
Q = 192.50 J/sec E = 3.57 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 290.88 K, T2 = 289.38 K
Q = 210.00 J/sec E = 3.98 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 291.00 K, T2 = 289.50 K
Q = 210.00 J/sec E = 4.12 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 291.13 K, T2 = 289.56 K
Q = 218.75 J/sec E = 4.35 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 291.25 K, T2 = 289.63 K
Q = 227.50 J/sec E = 4.60 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 291.44 K, T2 = 289.75 K
Q = 236.25 J/sec E = 4.85 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 291.50 K, T2 = 289.88 K
Q = 227.50 J/sec E = 4.79 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 291.69 K, T2 = 290.00 K
Q = 236.25 J/sec E = 5.10 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 291.81 K, T2 = 290.13 K
Q = 236.25 J/sec E = 5.20 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 291.94 K, T2 = 290.19 K
Q = 245.00 J/sec E = 5.47 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 292.06 K, T2 = 290.25 K

Продолжение таблицы Г.1

Q = 253.75 J/sec E = 5.74 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 292.19 K, T2 = 290.31 K
Q = 262.50 J/sec E = 6.03 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 292.31 K, T2 = 290.44 K
Q = 262.50 J/sec E = 6.14 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 292.44 K, T2 = 290.50 K
Q = 271.25 J/sec E = 6.48 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 292.50 K, T2 = 290.63 K
Q = 262.50 J/sec E = 6.36 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 292.69 K, T2 = 290.75 K
Q = 271.25 J/sec E = 6.71 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 292.81 K, T2 = 290.88 K
Q = 271.25 J/sec E = 6.77 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 293.00 K, T2 = 290.94 K
Q = 288.75 J/sec E = 7.39 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 293.06 K, T2 = 291.00 K
Q = 288.75 J/sec E = 7.45 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 293.19 K, T2 = 291.06 K
Q = 297.50 J/sec E = 7.76 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 293.38 K, T2 = 291.19 K
Q = 306.25 J/sec E = 8.09 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 293.50 K, T2 = 291.25 K
Q = 315.00 J/sec E = 8.48 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 293.69 K, T2 = 291.44 K
Q = 315.00 J/sec E = 8.68 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 293.81 K, T2 = 291.56 K
Q = 315.00 J/sec E = 8.81 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.44K, T1 = 293.94 K, T2 = 291.69 K
Q = 315.00 J/sec E = 9.01 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 294.06 K, T2 = 291.81 K
Q = 315.00 J/sec E = 9.07 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.44K, T1 = 294.13 K, T2 = 292.00 K
Q = 297.50 J/sec E = 8.76 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.44K, T1 = 294.31 K, T2 = 292.06 K
Q = 315.00 J/sec E = 9.40 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.44K, T1 = 294.38 K, T2 = 292.19 K
Q = 306.25 J/sec E = 9.24 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.44K, T1 = 294.56 K, T2 = 292.31 K
Q = 315.00 J/sec E = 9.66 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.44K, T1 = 294.69 K, T2 = 292.44 K
Q = 315.00 J/sec E = 9.79 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.38K, T1 = 294.81 K, T2 = 292.56 K
Q = 315.00 J/sec E = 9.99 J/sec

Продолжение таблицы Г.1

Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.38K, T1 = 294.94 K, T2 = 292.69 K
Q = 315.00 J/sec E = 10.12 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.44K, T1 = 295.06 K, T2 = 292.81 K
Q = 315.00 J/sec E = 10.18 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.38K, T1 = 295.25 K, T2 = 292.94 K
Q = 323.75 J/sec E = 10.70 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.38K, T1 = 295.31 K, T2 = 293.00 K
Q = 323.75 J/sec E = 10.76 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.38K, T1 = 295.44 K, T2 = 293.19 K
Q = 315.00 J/sec E = 10.64 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.44K, T1 = 295.56 K, T2 = 293.31 K
Q = 315.00 J/sec E = 10.70 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.44K, T1 = 295.69 K, T2 = 293.38 K
Q = 323.75 J/sec E = 11.10 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.44K, T1 = 295.88 K, T2 = 293.56 K
Q = 323.75 J/sec E = 11.29 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.38K, T1 = 295.94 K, T2 = 293.63 K
Q = 323.75 J/sec E = 11.43 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.44K, T1 = 296.13 K, T2 = 293.75 K
Q = 332.50 J/sec E = 11.83 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.44K, T1 = 296.25 K, T2 = 293.88 K
Q = 332.50 J/sec E = 11.97 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.44K, T1 = 296.44 K, T2 = 294.00 K
Q = 341.25 J/sec E = 12.46 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.44K, T1 = 296.56 K, T2 = 294.13 K
Q = 341.25 J/sec E = 12.60 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.44K, T1 = 296.69 K, T2 = 294.25 K
Q = 341.25 J/sec E = 12.74 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.44K, T1 = 296.81 K, T2 = 294.31 K
Q = 350.00 J/sec E = 13.17 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 297.00 K, T2 = 294.50 K
Q = 350.00 J/sec E = 13.31 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.44K, T1 = 297.13 K, T2 = 294.63 K
Q = 350.00 J/sec E = 13.53 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.44K, T1 = 297.19 K, T2 = 294.75 K
Q = 341.25 J/sec E = 13.30 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.44K, T1 = 297.38 K, T2 = 294.88 K
Q = 350.00 J/sec E = 13.81 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.44K, T1 = 297.50 K, T2 = 295.00 K
Q = 350.00 J/sec E = 13.95 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.44K, T1 = 297.56 K, T2 = 295.13 K
Q = 341.25 J/sec E = 13.71 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.44K, T1 = 297.63 K, T2 = 295.25 K

Продолжение таблицы Г.1

Q = 332.50 J/sec E = 13.46 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 297.88 K, T2 = 295.44 K
Q = 341.25 J/sec E = 13.98 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 297.94 K, T2 = 295.50 K
Q = 341.25 J/sec E = 14.05 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 298.13 K, T2 = 295.63 K
Q = 350.00 J/sec E = 14.59 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 298.19 K, T2 = 295.81 K
Q = 332.50 J/sec E = 13.99 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 298.31 K, T2 = 295.94 K
Q = 332.50 J/sec E = 14.13 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 298.44 K, T2 = 296.06 K
Q = 332.50 J/sec E = 14.26 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 298.50 K, T2 = 296.25 K
Q = 315.00 J/sec E = 13.64 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 298.69 K, T2 = 296.38 K
Q = 323.75 J/sec E = 14.18 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 298.88 K, T2 = 296.50 K
Q = 332.50 J/sec E = 14.73 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 299.00 K, T2 = 296.63 K
Q = 332.50 J/sec E = 14.86 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 299.13 K, T2 = 296.75 K
Q = 332.50 J/sec E = 15.00 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 299.19 K, T2 = 296.94 K
Q = 315.00 J/sec E = 14.33 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 299.38 K, T2 = 297.13 K
Q = 315.00 J/sec E = 14.52 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 299.56 K, T2 = 297.19 K
Q = 332.50 J/sec E = 15.46 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 299.63 K, T2 = 297.31 K
Q = 323.75 J/sec E = 15.15 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 299.81 K, T2 = 297.50 K
Q = 323.75 J/sec E = 15.34 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 299.88 K, T2 = 297.56 K
Q = 323.75 J/sec E = 15.41 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 300.00 K, T2 = 297.75 K
Q = 315.00 J/sec E = 15.08 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 300.19 K, T2 = 297.88 K
Q = 323.75 J/sec E = 15.73 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 300.31 K, T2 = 298.00 K
Q = 323.75 J/sec E = 15.86 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 300.38 K, T2 = 298.13 K
Q = 315.00 J/sec E = 15.46 J/sec

Продолжение таблицы Г.1

Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 300.50 K, T2 = 298.25 K
Q = 315.00 J/sec E = 15.58 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 300.63 K, T2 = 298.44 K
Q = 306.25 J/sec E = 15.37 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 300.75 K, T2 = 298.56 K
Q = 306.25 J/sec E = 15.49 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 300.94 K, T2 = 298.75 K
Q = 306.25 J/sec E = 15.61 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 301.00 K, T2 = 298.88 K
Q = 297.50 J/sec E = 15.25 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 301.13 K, T2 = 298.94 K
Q = 306.25 J/sec E = 15.79 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 301.25 K, T2 = 299.13 K
Q = 297.50 J/sec E = 15.48 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 301.38 K, T2 = 299.25 K
Q = 297.50 J/sec E = 15.66 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 301.50 K, T2 = 299.38 K
Q = 297.50 J/sec E = 15.72 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 301.63 K, T2 = 299.44 K
Q = 306.25 J/sec E = 16.27 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 301.75 K, T2 = 299.56 K
Q = 306.25 J/sec E = 16.39 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 301.88 K, T2 = 299.69 K
Q = 306.25 J/sec E = 16.51 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 302.00 K, T2 = 299.75 K
Q = 315.00 J/sec E = 17.14 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 302.13 K, T2 = 299.94 K
Q = 306.25 J/sec E = 16.75 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 302.25 K, T2 = 300.00 K
Q = 315.00 J/sec E = 17.39 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 302.31 K, T2 = 300.06 K
Q = 315.00 J/sec E = 17.45 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 302.50 K, T2 = 300.13 K
Q = 332.50 J/sec E = 18.48 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 302.63 K, T2 = 300.31 K
Q = 323.75 J/sec E = 18.22 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 302.69 K, T2 = 300.38 K
Q = 323.75 J/sec E = 18.22 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 302.81 K, T2 = 300.44 K
Q = 332.50 J/sec E = 18.81 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 302.94 K, T2 = 300.50 K
Q = 341.25 J/sec E = 19.40 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 303.06 K, T2 = 300.63 K

Продолжение таблицы Г.1

Q = 341.25 J/sec E = 19.61 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 303.25 K, T2 = 300.75 K
Q = 350.00 J/sec E = 20.21 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 303.31 K, T2 = 300.81 K
Q = 350.00 J/sec E = 20.28 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 303.44 K, T2 = 300.94 K
Q = 350.00 J/sec E = 20.49 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 303.50 K, T2 = 301.13 K
Q = 332.50 J/sec E = 19.52 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 303.69 K, T2 = 301.19 K
Q = 350.00 J/sec E = 20.69 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.50K, T1 = 303.81 K, T2 = 301.38 K
Q = 341.25 J/sec E = 20.41 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 303.88 K, T2 = 301.50 K
Q = 332.50 J/sec E = 19.91 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 304.00 K, T2 = 301.63 K
Q = 332.50 J/sec E = 20.04 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 304.13 K, T2 = 301.81 K
Q = 323.75 J/sec E = 19.67 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 304.25 K, T2 = 301.94 K
Q = 323.75 J/sec E = 19.79 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 304.38 K, T2 = 302.00 K
Q = 332.50 J/sec E = 20.42 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 304.50 K, T2 = 302.19 K
Q = 323.75 J/sec E = 20.04 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.56K, T1 = 304.63 K, T2 = 302.31 K
Q = 323.75 J/sec E = 20.17 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 304.69 K, T2 = 302.44 K
Q = 315.00 J/sec E = 19.65 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 304.81 K, T2 = 302.56 K
Q = 315.00 J/sec E = 19.77 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 304.94 K, T2 = 302.69 K
Q = 315.00 J/sec E = 19.89 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 305.06 K, T2 = 302.75 K
Q = 323.75 J/sec E = 20.54 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 305.19 K, T2 = 302.88 K
Q = 323.75 J/sec E = 20.67 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 305.31 K, T2 = 302.94 K
Q = 332.50 J/sec E = 21.32 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 305.38 K, T2 = 303.13 K
Q = 315.00 J/sec E = 20.32 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 305.50 K, T2 = 303.25 K



Продолжение таблицы Г.1

Q = 315.00 J/sec E = 20.44 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 305.63 K, T2 = 303.38 K
Q = 315.00 J/sec E = 20.56 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 305.75 K, T2 = 303.44 K
Q = 323.75 J/sec E = 21.22 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 305.88 K, T2 = 303.56 K
Q = 323.75 J/sec E = 21.35 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 306.00 K, T2 = 303.63 K
Q = 332.50 J/sec E = 22.02 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 306.06 K, T2 = 303.75 K
Q = 323.75 J/sec E = 21.53 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 306.25 K, T2 = 303.88 K
Q = 332.50 J/sec E = 22.27 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 306.38 K, T2 = 304.00 K
Q = 332.50 J/sec E = 22.40 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 306.44 K, T2 = 304.06 K
Q = 332.50 J/sec E = 22.46 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 306.56 K, T2 = 304.25 K
Q = 323.75 J/sec E = 22.03 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 306.69 K, T2 = 304.31 K
Q = 332.50 J/sec E = 22.72 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 306.81 K, T2 = 304.44 K
Q = 332.50 J/sec E = 22.84 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 306.94 K, T2 = 304.56 K
Q = 332.50 J/sec E = 22.90 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 307.06 K, T2 = 304.69 K
Q = 332.50 J/sec E = 23.03 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 307.19 K, T2 = 304.81 K
Q = 332.50 J/sec E = 23.16 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 307.31 K, T2 = 304.88 K
Q = 341.25 J/sec E = 23.86 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 307.44 K, T2 = 305.00 K
Q = 341.25 J/sec E = 23.99 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 307.56 K, T2 = 305.13 K
Q = 341.25 J/sec E = 24.12 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 307.63 K, T2 = 305.25 K
Q = 332.50 J/sec E = 23.66 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 307.75 K, T2 = 305.38 K
Q = 332.50 J/sec E = 23.72 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 307.88 K, T2 = 305.50 K
Q = 332.50 J/sec E = 23.85 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 308.00 K, T2 = 305.56 K

Продолжение таблицы Г.1

Q = 341.25 J/sec E = 24.57 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 308.13 K, T2 = 305.69 K
Q = 341.25 J/sec E = 24.77 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 308.25 K, T2 = 305.81 K
Q = 341.25 J/sec E = 24.83 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 308.38 K, T2 = 305.94 K
Q = 341.25 J/sec E = 24.96 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 308.50 K, T2 = 306.06 K
Q = 341.25 J/sec E = 25.16 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 308.63 K, T2 = 306.19 K
Q = 341.25 J/sec E = 25.22 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 308.69 K, T2 = 306.31 K
Q = 332.50 J/sec E = 24.73 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 308.88 K, T2 = 306.44 K
Q = 341.25 J/sec E = 25.47 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 308.94 K, T2 = 306.50 K
Q = 341.25 J/sec E = 25.61 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 309.06 K, T2 = 306.63 K
Q = 341.25 J/sec E = 25.67 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 309.19 K, T2 = 306.75 K
Q = 341.25 J/sec E = 25.86 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 309.31 K, T2 = 306.88 K
Q = 341.25 J/sec E = 26.00 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 309.44 K, T2 = 307.00 K
Q = 341.25 J/sec E = 26.12 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 309.56 K, T2 = 307.06 K
Q = 350.00 J/sec E = 26.82 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 309.63 K, T2 = 307.19 K
Q = 341.25 J/sec E = 26.31 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 309.75 K, T2 = 307.31 K
Q = 341.25 J/sec E = 26.44 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 309.88 K, T2 = 307.38 K
Q = 350.00 J/sec E = 27.14 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 310.00 K, T2 = 307.50 K
Q = 350.00 J/sec E = 27.28 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 310.13 K, T2 = 307.63 K
Q = 350.00 J/sec E = 27.48 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 310.19 K, T2 = 307.63 K
Q = 358.75 J/sec E = 28.12 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 310.31 K, T2 = 307.81 K
Q = 350.00 J/sec E = 27.60 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 310.44 K, T2 = 307.88 K

Продолжение таблицы Г.1

Q = 358.75 J/sec E = 28.46 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 310.56 K, T2 = 307.94 K
Q = 367.50 J/sec E = 29.19 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 310.69 K, T2 = 308.00 K
Q = 376.25 J/sec E = 29.99 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 310.81 K, T2 = 308.13 K
Q = 376.25 J/sec E = 30.20 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 310.94 K, T2 = 308.19 K
Q = 385.00 J/sec E = 30.93 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 311.06 K, T2 = 308.31 K
Q = 385.00 J/sec E = 31.16 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 311.19 K, T2 = 308.38 K
Q = 393.75 J/sec E = 31.89 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 311.25 K, T2 = 308.44 K
Q = 393.75 J/sec E = 32.04 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 311.44 K, T2 = 308.63 K
Q = 393.75 J/sec E = 32.19 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 311.50 K, T2 = 308.69 K
Q = 393.75 J/sec E = 32.34 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 311.63 K, T2 = 308.81 K
Q = 393.75 J/sec E = 32.48 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 311.75 K, T2 = 309.00 K
Q = 385.00 J/sec E = 31.94 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 311.88 K, T2 = 309.13 K
Q = 385.00 J/sec E = 32.00 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 311.94 K, T2 = 309.19 K
Q = 385.00 J/sec E = 32.07 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 312.06 K, T2 = 309.31 K
Q = 385.00 J/sec E = 32.22 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 312.13 K, T2 = 309.44 K
Q = 376.25 J/sec E = 31.66 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 312.25 K, T2 = 309.63 K
Q = 367.50 J/sec E = 31.10 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 312.38 K, T2 = 309.63 K
Q = 385.00 J/sec E = 32.65 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 312.50 K, T2 = 309.75 K
Q = 385.00 J/sec E = 32.71 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 312.63 K, T2 = 309.88 K
Q = 385.00 J/sec E = 32.85 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 312.69 K, T2 = 310.00 K
Q = 376.25 J/sec E = 32.21 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 312.81 K, T2 = 310.06 K

Продолжение таблицы Г.1

Q = 385.00 J/sec E = 33.07 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 312.88 K, T2 = 310.19 K
Q = 376.25 J/sec E = 32.42 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 313.06 K, T2 = 310.25 K
Q = 393.75 J/sec E = 34.07 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 313.13 K, T2 = 310.38 K
Q = 385.00 J/sec E = 33.42 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 313.25 K, T2 = 310.50 K
Q = 385.00 J/sec E = 33.56 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 313.31 K, T2 = 310.56 K
Q = 385.00 J/sec E = 33.63 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 313.44 K, T2 = 310.69 K
Q = 385.00 J/sec E = 33.85 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 313.56 K, T2 = 310.81 K
Q = 385.00 J/sec E = 33.91 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 313.69 K, T2 = 310.88 K
Q = 393.75 J/sec E = 34.79 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 313.75 K, T2 = 311.00 K
Q = 385.00 J/sec E = 34.12 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 313.94 K, T2 = 311.06 K
Q = 402.50 J/sec E = 35.82 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 314.00 K, T2 = 311.19 K
Q = 393.75 J/sec E = 35.07 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 314.13 K, T2 = 311.25 K
Q = 402.50 J/sec E = 35.96 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 314.25 K, T2 = 311.38 K
Q = 402.50 J/sec E = 36.19 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 314.38 K, T2 = 311.50 K
Q = 402.50 J/sec E = 36.33 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 314.44 K, T2 = 311.63 K
Q = 393.75 J/sec E = 35.65 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 314.56 K, T2 = 311.69 K
Q = 402.50 J/sec E = 36.55 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 314.63 K, T2 = 311.81 K
Q = 393.75 J/sec E = 35.86 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 314.75 K, T2 = 311.94 K
Q = 393.75 J/sec E = 36.01 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 314.88 K, T2 = 312.00 K
Q = 402.50 J/sec E = 36.92 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 315.00 K, T2 = 312.25 K
Q = 385.00 J/sec E = 35.52 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 315.13 K, T2 = 312.31 K

Продолжение таблицы Г.1

Q = 393.75 J/sec E = 36.43 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 315.19 K, T2 = 312.44 K
Q = 385.00 J/sec E = 35.80 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 315.31 K, T2 = 312.56 K
Q = 385.00 J/sec E = 35.87 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 315.44 K, T2 = 312.69 K
Q = 385.00 J/sec E = 36.01 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 315.50 K, T2 = 312.81 K
Q = 376.25 J/sec E = 35.29 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.63K, T1 = 315.63 K, T2 = 312.88 K
Q = 385.00 J/sec E = 36.29 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 315.75 K, T2 = 312.94 K
Q = 393.75 J/sec E = 37.14 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 315.81 K, T2 = 313.06 K
Q = 385.00 J/sec E = 36.42 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 315.94 K, T2 = 313.19 K
Q = 385.00 J/sec E = 36.48 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 316.00 K, T2 = 313.25 K
Q = 385.00 J/sec E = 36.56 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 316.13 K, T2 = 313.31 K
Q = 393.75 J/sec E = 37.57 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 316.19 K, T2 = 313.44 K
Q = 385.00 J/sec E = 36.76 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 316.31 K, T2 = 313.50 K
Q = 393.75 J/sec E = 37.70 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 316.44 K, T2 = 313.69 K
Q = 385.00 J/sec E = 37.04 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 316.56 K, T2 = 313.75 K
Q = 393.75 J/sec E = 38.06 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 316.63 K, T2 = 313.88 K
Q = 385.00 J/sec E = 37.17 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 316.75 K, T2 = 313.94 K
Q = 393.75 J/sec E = 38.20 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 316.88 K, T2 = 314.13 K
Q = 385.00 J/sec E = 37.52 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 316.94 K, T2 = 314.19 K
Q = 385.00 J/sec E = 37.59 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 317.00 K, T2 = 314.31 K
Q = 376.25 J/sec E = 36.91 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 317.13 K, T2 = 314.38 K
Q = 385.00 J/sec E = 37.88 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 317.25 K, T2 = 314.50 K

Продолжение таблицы Г.1

Q = 385.00 J/sec E = 38.01 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 317.31 K, T2 = 314.63 K
Q = 376.25 J/sec E = 37.25 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 317.44 K, T2 = 314.75 K
Q = 376.25 J/sec E = 37.38 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 317.56 K, T2 = 314.81 K
Q = 385.00 J/sec E = 38.36 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 317.63 K, T2 = 314.94 K
Q = 376.25 J/sec E = 37.51 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 317.75 K, T2 = 315.06 K
Q = 376.25 J/sec E = 37.64 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 317.88 K, T2 = 315.19 K
Q = 376.25 J/sec E = 37.77 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 318.00 K, T2 = 315.31 K
Q = 376.25 J/sec E = 37.91 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 318.13 K, T2 = 315.44 K
Q = 376.25 J/sec E = 38.04 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 318.19 K, T2 = 315.50 K
Q = 376.25 J/sec E = 38.18 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 318.31 K, T2 = 315.63 K
Q = 376.25 J/sec E = 38.24 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 318.44 K, T2 = 315.75 K
Q = 376.25 J/sec E = 38.38 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 318.56 K, T2 = 315.81 K
Q = 385.00 J/sec E = 39.45 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 318.63 K, T2 = 315.94 K
Q = 376.25 J/sec E = 38.58 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 318.75 K, T2 = 315.94 K
Q = 393.75 J/sec E = 40.44 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 318.88 K, T2 = 316.13 K
Q = 385.00 J/sec E = 39.71 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 319.00 K, T2 = 316.19 K
Q = 393.75 J/sec E = 40.72 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 319.13 K, T2 = 316.25 K
Q = 402.50 J/sec E = 41.73 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 319.19 K, T2 = 316.31 K
Q = 402.50 J/sec E = 41.80 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 319.31 K, T2 = 316.38 K
Q = 411.25 J/sec E = 42.90 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 319.44 K, T2 = 316.56 K
Q = 402.50 J/sec E = 42.16 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 319.56 K, T2 = 316.63 K

Продолжение таблицы Г.1

Q = 411.25 J/sec E = 43.10 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 319.69 K, T2 = 316.69 K
Q = 420.00 J/sec E = 44.22 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 319.75 K, T2 = 316.81 K
Q = 411.25 J/sec E = 43.32 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 319.88 K, T2 = 316.94 K
Q = 411.25 J/sec E = 43.47 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 320.00 K, T2 = 317.06 K
Q = 411.25 J/sec E = 43.69 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 320.06 K, T2 = 317.19 K
Q = 402.50 J/sec E = 42.87 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 320.19 K, T2 = 317.25 K
Q = 411.25 J/sec E = 43.91 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 320.25 K, T2 = 317.31 K
Q = 411.25 J/sec E = 43.98 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 320.38 K, T2 = 317.44 K
Q = 411.25 J/sec E = 44.05 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 320.44 K, T2 = 317.50 K
Q = 411.25 J/sec E = 44.12 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 320.56 K, T2 = 317.63 K
Q = 411.25 J/sec E = 44.34 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 320.69 K, T2 = 317.69 K
Q = 420.00 J/sec E = 45.31 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 320.75 K, T2 = 317.69 K
Q = 428.75 J/sec E = 46.38 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 320.81 K, T2 = 317.75 K
Q = 428.75 J/sec E = 46.37 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 320.94 K, T2 = 317.88 K
Q = 428.75 J/sec E = 46.52 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 321.06 K, T2 = 317.94 K
Q = 437.50 J/sec E = 47.58 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 321.19 K, T2 = 318.00 K
Q = 446.25 J/sec E = 48.65 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 321.25 K, T2 = 318.13 K
Q = 437.50 J/sec E = 47.81 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 321.38 K, T2 = 318.19 K
Q = 446.25 J/sec E = 48.88 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 321.50 K, T2 = 318.31 K
Q = 446.25 J/sec E = 48.95 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 321.56 K, T2 = 318.44 K
Q = 437.50 J/sec E = 48.10 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 321.63 K, T2 = 318.50 K

Продолжение таблицы Г.1

Q = 437.50 J/sec E = 48.27 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 321.75 K, T2 = 318.69 K
Q = 428.75 J/sec E = 47.40 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 321.81 K, T2 = 318.75 K
Q = 428.75 J/sec E = 47.48 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 321.94 K, T2 = 318.81 K
Q = 437.50 J/sec E = 48.56 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 322.06 K, T2 = 318.94 K
Q = 437.50 J/sec E = 48.71 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 322.13 K, T2 = 319.06 K
Q = 428.75 J/sec E = 47.85 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 322.25 K, T2 = 319.13 K
Q = 437.50 J/sec E = 48.94 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 322.31 K, T2 = 319.19 K
Q = 437.50 J/sec E = 49.01 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.88K, T1 = 322.44 K, T2 = 319.31 K
Q = 437.50 J/sec E = 49.08 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 322.56 K, T2 = 319.38 K
Q = 446.25 J/sec E = 50.27 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 322.63 K, T2 = 319.44 K
Q = 446.25 J/sec E = 50.34 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 322.69 K, T2 = 319.56 K
Q = 437.50 J/sec E = 49.47 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.88K, T1 = 322.81 K, T2 = 319.56 K
Q = 455.00 J/sec E = 51.44 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 322.94 K, T2 = 319.63 K
Q = 463.75 J/sec E = 52.64 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 323.00 K, T2 = 319.69 K
Q = 463.75 J/sec E = 52.72 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 323.06 K, T2 = 319.75 K
Q = 463.75 J/sec E = 52.80 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.88K, T1 = 323.19 K, T2 = 319.81 K
Q = 472.50 J/sec E = 53.83 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.88K, T1 = 323.31 K, T2 = 319.94 K
Q = 472.50 J/sec E = 53.99 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.88K, T1 = 323.38 K, T2 = 320.00 K
Q = 472.50 J/sec E = 54.07 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 323.50 K, T2 = 320.00 K
Q = 490.00 J/sec E = 56.25 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.88K, T1 = 323.56 K, T2 = 320.06 K
Q = 490.00 J/sec E = 56.24 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 323.63 K, T2 = 320.13 K



Продолжение таблицы Г.1

Q = 490.00 J/sec E = 56.42 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 323.75 K, T2 = 320.13 K
Q = 507.50 J/sec E = 58.52 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 323.81 K, T2 = 320.19 K
Q = 507.50 J/sec E = 58.60 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 323.94 K, T2 = 320.31 K
Q = 507.50 J/sec E = 58.78 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 324.00 K, T2 = 320.44 K
Q = 498.75 J/sec E = 57.90 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 324.13 K, T2 = 320.50 K
Q = 507.50 J/sec E = 59.04 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 324.25 K, T2 = 320.56 K
Q = 516.25 J/sec E = 60.19 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 324.31 K, T2 = 320.63 K
Q = 516.25 J/sec E = 60.28 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 324.44 K, T2 = 320.75 K
Q = 516.25 J/sec E = 60.45 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 324.50 K, T2 = 320.88 K
Q = 507.50 J/sec E = 59.56 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 324.63 K, T2 = 320.94 K
Q = 516.25 J/sec E = 60.82 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 324.69 K, T2 = 321.00 K
Q = 516.25 J/sec E = 60.81 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 324.75 K, T2 = 321.13 K
Q = 507.50 J/sec E = 60.01 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 324.88 K, T2 = 321.19 K
Q = 516.25 J/sec E = 61.17 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 324.94 K, T2 = 321.31 K
Q = 507.50 J/sec E = 60.27 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 325.06 K, T2 = 321.38 K
Q = 516.25 J/sec E = 61.44 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 325.19 K, T2 = 321.38 K
Q = 533.75 J/sec E = 63.61 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 325.25 K, T2 = 321.44 K
Q = 533.75 J/sec E = 63.70 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 325.31 K, T2 = 321.56 K
Q = 525.00 J/sec E = 62.79 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 325.44 K, T2 = 321.56 K
Q = 542.50 J/sec E = 64.98 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 325.50 K, T2 = 321.69 K
Q = 533.75 J/sec E = 64.17 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 325.69 K, T2 = 321.75 K

Продолжение таблицы Г.1

Q = 551.25 J/sec E = 66.35 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 325.75 K, T2 = 321.81 K
Q = 551.25 J/sec E = 66.45 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 325.81 K, T2 = 321.94 K
Q = 542.50 J/sec E = 65.64 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 325.88 K, T2 = 322.00 K
Q = 542.50 J/sec E = 65.73 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.69K, T1 = 326.00 K, T2 = 322.06 K
Q = 551.25 J/sec E = 66.93 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 326.13 K, T2 = 322.13 K
Q = 560.00 J/sec E = 68.02 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 326.19 K, T2 = 322.13 K
Q = 568.75 J/sec E = 69.14 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 326.25 K, T2 = 322.19 K
Q = 568.75 J/sec E = 69.23 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 326.38 K, T2 = 322.19 K
Q = 586.25 J/sec E = 71.46 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 326.44 K, T2 = 322.13 K
Q = 603.75 J/sec E = 73.59 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 326.50 K, T2 = 322.13 K
Q = 612.50 J/sec E = 74.71 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 326.63 K, T2 = 322.00 K
Q = 647.50 J/sec E = 78.98 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 326.75 K, T2 = 322.06 K
Q = 656.25 J/sec E = 80.21 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 326.81 K, T2 = 321.94 K
Q = 682.50 J/sec E = 83.36 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 326.94 K, T2 = 322.00 K
Q = 691.25 J/sec E = 84.60 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 327.00 K, T2 = 321.94 K
Q = 708.75 J/sec E = 86.61 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 327.06 K, T2 = 322.00 K
Q = 708.75 J/sec E = 86.87 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 327.13 K, T2 = 322.00 K
Q = 717.50 J/sec E = 87.86 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 327.25 K, T2 = 322.00 K
Q = 735.00 J/sec E = 90.13 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.75K, T1 = 327.38 K, T2 = 322.00 K
Q = 752.50 J/sec E = 92.55 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 327.44 K, T2 = 322.06 K
Q = 752.50 J/sec E = 92.53 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.88K, T1 = 327.56 K, T2 = 322.06 K

Продолжение таблицы Г.1

Q = 770.00 J/sec E = 94.66 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 327.63 K, T2 = 322.06 K
Q = 778.75 J/sec E = 95.95 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 327.75 K, T2 = 322.13 K
Q = 787.50 J/sec E = 97.23 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.88K, T1 = 327.81 K, T2 = 322.13 K
Q = 796.25 J/sec E = 98.22 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 327.94 K, T2 = 322.19 K
Q = 805.00 J/sec E = 99.66 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 328.06 K, T2 = 322.19 K
Q = 822.50 J/sec E = 101.96 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.81K, T1 = 328.13 K, T2 = 322.31 K
Q = 813.75 J/sec E = 101.08 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.88K, T1 = 328.25 K, T2 = 322.31 K
Q = 831.25 J/sec E = 103.24 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.88K, T1 = 328.31 K, T2 = 322.38 K
Q = 831.25 J/sec E = 103.38 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.88K, T1 = 328.44 K, T2 = 322.31 K
Q = 857.50 J/sec E = 106.71 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.88K, T1 = 328.50 K, T2 = 322.06 K
Q = 901.25 J/sec E = 111.93 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.88K, T1 = 328.63 K, T2 = 321.81 K
Q = 953.75 J/sec E = 118.28 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.88K, T1 = 328.75 K, T2 = 321.38 K
Q = 1032.50 J/sec E = 127.61 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.88K, T1 = 328.75 K, T2 = 320.94 K
Q = 1093.75 J/sec E = 134.53 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.88K, T1 = 328.88 K, T2 = 320.50 K
Q = 1172.50 J/sec E = 143.71 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.88K, T1 = 329.00 K, T2 = 320.06 K
Q = 1251.25 J/sec E = 152.83 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.88K, T1 = 329.06 K, T2 = 319.63 K
Q = 1321.25 J/sec E = 160.70 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.88K, T1 = 329.19 K, T2 = 319.25 K
Q = 1391.25 J/sec E = 168.73 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.88K, T1 = 329.25 K, T2 = 318.69 K
Q = 1478.75 J/sec E = 178.33 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.88K, T1 = 329.38 K, T2 = 318.31 K
Q = 1548.75 J/sec E = 186.23 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.94K, T1 = 329.44 K, T2 = 317.88 K
Q = 1618.75 J/sec E = 193.50 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.94K, T1 = 329.56 K, T2 = 317.50 K

*Продолжение таблицы Г.1*

Q = 1688.75 J/sec E = 201.28 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.88K, T1 = 329.69 K, T2 = 317.13 K
Q = 1758.75 J/sec E = 209.35 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.88K, T1 = 329.75 K, T2 = 316.75 K
Q = 1820.00 J/sec E = 215.85 J/sec
Speed = 0.03 kg/sec, T0 = 284.94K, T1 = 329.88 K, T2 = 316.31 K
Q = 1898.75 J/sec E = 223.99 J/sec

**ПРИЛОЖЕНИЕ Д****Акт внедрения****АКТ****о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы  
Юшковой Екатерины Александровны**

Мы, нижеподписавшиеся, представители ООО «ПО «Киришинефтеоргсинтез» составили настоящий акт о внедрении и использовании результатов диссертационной работы Е.А. Юшковой, посвященной теоретическим основам анализа эффективности систем теплообмена в проектно-конструкторской деятельности предприятия при проработке вариантов проектирования установок по следующим направлениям:

1. Математическая модель оптимизации систем теплообмена на основе эксергетического пинч-анализа.
2. Методика эксергетического пинч-анализа анализа для структурной и параметрической оптимизации элементов систем теплообмена;

Внедрение и использование результатов диссертационной работы Е.А. Юшковой позволяет уменьшить расход энергетических ресурсов при реконструкции или построения новой установки первичной перегонки нефти за счёт выполнения оптимальной системы теплообмена на этапе проектирования.

Начальник  
цеха №1

  
С.В.Расказов

Заместитель начальника  
цеха №1

  
В.П.Савеленко

Заместитель начальника  
цеха №1

  
С.А.Алексеев



23.01.2020.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

### Показания приборов установки ЭЛОУ-АТ-6

Таблица Е.1 – Показания приборов установки ЭЛОУ-АТ-6

Поток	Назначение	Показание	Единица измерения
Нефть до ЭЛОУ	Температура на входе на установку	14	°С
	Давление на входе на установку	26,588	кгс/см <sup>2</sup>
	Расход 1-ой ветки	470,142	м <sup>3</sup> /ч
	Расход 2-ой ветки	469,858	м <sup>3</sup> /ч
	Температура 1-ой ветки после Т-3А	140,7	°С
	Температура 2-ой ветки после Т-33/2	92,6	°С
	Температура на входе в ЭЛОУ	118,8	°С
Нефть после ЭЛОУ	Давление на выходе с ЭЛОУ	9,867	кгс/см <sup>2</sup>
	Расход 1-ой ветки	290,169	м <sup>3</sup> /ч
	Расход 2-ой ветки	347,267	м <sup>3</sup> /ч
	Расход 3-ей ветки	378,785	м <sup>3</sup> /ч
	Температура 1-ой ветки после Т-9	244,6	°С
	Температура 2-ой ветки после Т-4/1	243,6	°С
	Температура 3-ей ветки после Т-4/3	243,8	°С
1 ЦО колонны К-2	Общий расход	740,149	м <sup>3</sup> /ч
	Температура на выходе из колонны	109,5	°С
	Температура после Т-3/1, Т-31 в колонну	74,5	°С
2 ЦО колонны К-2	Общий расход	359,2	м <sup>3</sup> /ч
	Температура на выходе из колонны	261,8	°С
	Температура на входе после Т-3/1 колонну	72,6	°С
ДТ колонны К-7	Общий расход	246,931	м <sup>3</sup> /ч
	Температура на выходе из К-7	265,5	°С
	Температура в Т-25	200,900	°С
	Температура в Т-11/1	193,1	°С
	Температура в Т-23	76,550	°С
Керосин колонны К-6	Температура на выход с установки	55,4	°С
	Общий расход	125,252	м <sup>3</sup> /ч
	Давление на выходе из К-6	10,46	кгс/см <sup>2</sup>
	Температура на выходе из К-6	163,141	°С
	Температура после Т-22А, Т-22Б	101,8	°С
	Температура после Т-22	73,55	°С
	Температура после Т-21	67	°С
Температура на выход с установки	57,85	°С	

Продолжение таблицы Е.1

Мазут колонны К-2	Общий расход	549,466	м3/ч
	Расход 1-ой ветки	239,	м3/ч
	Расход 2-ой ветки	310,466	м3/ч
	Температура на выходе с установки	355,3	°С
	Температура к Т-24	89,1	°С
	Температура на выходе с установки	81,7	°С
Фракция нк- 62°С Колонны К- 3	Общий расход	19,88	т/ч
	Давление на выходе с К-3	2,1	кгс/см2
	Температура на выходе с К-3	84,759	°С
	Температура перед Т-14	70,25	°С
Фракция 62- 105°С Колонны К- 3	Температура на выходе с установки	33,5	°С
	Общий расход	30,222	м3/ч
	Давление на выходе с К-3	2,7	кгс/см2
	Температура на выходе с К-3	119,7	°С
	Температура после Т-13А	105,3	°С
Фракция 105-180°С Колонны К- 5	Температура на выходе с установки	34,2	°С
	Общий расход	30,222	м3/ч
	Давление на выходе с К-5	2,58	кгс/см2
	Температура на выходе с К-5	166	°С
	Температура после Т-17А, Т-17Б	87,25	°С
Температура на выходе с установки	43,65	°С	

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

## Оптимизированная система теплообменников котельного агрегата эскергетическим пинч-анализом

