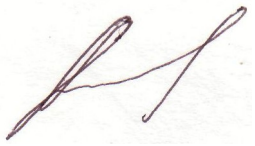
На правах рукописи



Агапов Дмитрий Станиславович

СТРУКТУРНАЯ И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННОГО ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

05.14.04 — «Промышленная теплоэнергетика»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена на кафедре «Автомобили, тракторы и технический сервис» Института технических систем, сервиса и энергетики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»

Научный консультант: **Картошкин Александр Петрович**
доктор технических наук, профессор, зав. каф. «Автомобили, тракторы и технический сервис»
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет»

Официальные оппоненты: **Горбунов Владимир Александрович**
доктор технических наук, доцент, зав. каф. «Атомные электростанции»
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Лепеш Григорий Васильевич
доктор технических наук, профессор, зав. каф. «Машины и оборудование бытового и жилищно-коммунального назначения»
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный экономический университет».

Петриченко Михаил Романович
доктор технических наук, профессор, зав.каф. «Гидравлика»
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна.

Защита состоится «17» октября 2017 г. в $14^{\underline{00}}$ на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования « Санкт–Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. д. 29, ПГК, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» www.spbstu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
д.т.н. Митяков А. В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

Необходимость совершенствования промышленных теплоэнергетических систем, разработки и создания нового теплотехнического и теплового технологического оборудования напрямую связаны с требованиями уменьшения энергетических затрат на единицу продукции, сбережения материальных ресурсов и защитой окружающей среды. Однако достижение эффективности производства оценивается множеством взаимозависимых критериев.

Применяемый на ранних этапах создания новой техники и технологий балансовый (энтальпийный) метод оценки энергетической эффективности технических систем не позволяет в полной мере дать их объективную оценку. Это обусловлено как сменой целевых функций оптимизации производств (энергосбережение, энергоэффективность, экологическая безопасность, ресурсосбережение и др.), так и попыткой поиска глобального решения, одинаково удовлетворяющего (неудовлетворяющего) всем критериям оптимизации. Под ресурсосбережением понимается система мер по обеспечению рационального использования различных ресурсов – энергетических, финансовых, сырьевых и т.п.

Усложнение производственных технологий и техническое совершенствование применяемого теплотехнического и технологического оборудования все более затрудняет решение задач производственной оптимизации. Определенные перспективы открывает применение опыта эмпирического улучшения технических систем на основе разработанных эффективных математических методов оптимизации и алгоритмов для их компьютерной реализации.

В связи с этим возникает необходимость создания единой концепции термодинамического и термоэкономического совершенствования, структурной и параметрической оптимизации промышленных теплоэнергетических систем, теплотехнического и технологического оборудования на всех этапах их существования (проектирование, конструирование, производство, эксплуатация и утилизация). В случае решения этой актуальной задачи появляется возможность найти оптимальные решения на основе математических методов с учетом практических экспертных оценок.

Научная концепция.

Оценка термодинамического совершенства промышленных теплоэнергетических систем, входящего в них теплотехнического и технологического оборудования, разработка решений по ресурсосбережению осуществляется на основе интеграции тепловых потоков (пинч-технология) и термоэкономического анализа.

Цель работы.

Создание научных основ для совершенствования промышленного теплотехнического и технологического оборудования, ресурсосбережения при его проектировании и эксплуатации с помощью структурной и параметрической оптимизации.

В соответствии с поставленной целью определены следующие **задачи**:

1. Проанализировать современные производства различного назначения

по энергетическим параметрам и установить связи между составляющими энергетического баланса применяемых технологических линий и силовых установок на различных режимах работы; выявить целесообразные направления улучшения структурных и параметрических показателей промышленного теплотехнического и технологического оборудования;

2. Разработать метод оптимизации систем промышленного теплотехнического и технологического оборудования, позволяющий в комплексе производить их структурную и параметрическую оптимизацию на основе принципов неравновесной термодинамики и технологии интеграции тепловых потоков;

3. Синтезировать критерий оценки структурного совершенства промышленного теплотехнического и технологического оборудования и на его основе создать обобщенный показатель термодинамического совершенства технических систем с использованием критерия совершенства протекающих в системах процессов;

4. Найти и предложить алгоритм структурной оптимизации теплообменных связей промышленного теплотехнического и технологического оборудования;

5. Разработать способ и средство интеграции нестационарных тепловых потоков;

6. Создать программу автоматизированного проектирования оптимальных теплообменных схем с возможностью учета экспертных рекомендаций;

7. Произвести структурную и параметрическую оптимизацию нескольких существующих вариантов промышленного теплотехнического и технологического оборудования;

8. Провести экспериментальную проверку определенных в процессе параметрической оптимизации рабочих параметров функционирования оборудования;

9. Разработать метод оценки и повышения показателей термодинамического совершенства промышленного теплотехнического и технологического оборудования. Выработать рекомендации по ее применению;

10. Обоснованно предложить элементы усовершенствования термоэкономического анализа и, с их учетом, провести технико-экономическую оценку промышленного теплотехнического и технологического оборудования.

Объект исследований.

Теплотехнические системы в технологических процессах производств различного назначения.

Предмет исследований.

Процессы преобразования энергии в теплотехнических системах и принципы их совершенствования путем структурной и параметрической оптимизации теплотехнического и технологического оборудования промышленных производств.

Методология и методы исследований.

В основу методологии исследования положено сочетание теоретического анализа процессов передачи и преобразования энергии, протекающих в различных установках, с экспериментальными и расчетными исследованиями.

В теоретических исследованиях использовались основные положения теории теплообмена, теории тепловых двигателей, классической термодинамики, методы математического моделирования, численные методы решения уравнений и задач оптимизации с применением вычислительной техники.

При экспериментальных исследованиях на натурных образцах технологического оборудования использовались современные исследовательские методики на основе теории планирования эксперимента, корреляционного и регрессионного анализа.

Предложена методика, включающая три этапа: при термодинамическом совершенствовании отдельных элементов промышленного теплотехнического оборудования применяется эксергетический анализ; структурный анализ существующей или синтез новой технологических систем осуществляется интеграцией тепловых потоков на основе пинч-анализа; параметрическое совершенствование промышленного теплотехнического оборудования достигается улучшением его термоэкономических показателей.

Достоверность результатов и выводов работы.

Достоверность результатов и выводов работы подтверждена:

— применением современных апробированных методов исследования на основе законов термодинамики и теплопередачи; обоснованностью принятых теоретических предпосылок, а также опыта, накопленного учеными при изучении энергетических систем;

— использованием теории математического планирования эксперимента; современного оборудования и средств регистрации исследуемых показателей; приборов, прошедших сертификацию согласно стандарту; достаточной точностью применявшегося информационно-измерительного комплекса;

— строгостью математического аппарата, используемого в работе; использованием общепринятых методик, методов математической статистики; проверкой расчетов с помощью компьютерных технологий;

— оценкой погрешностей; согласованием полученных зависимостей с теоретическими положениями и данными экспериментов, хорошей сходимостью расчетных и экспериментальных данных и их удовлетворительным совпадением.

Научную новизну работы составляют:

1. Критерий степени интеграции тепловых потоков;
2. Обобщенный показатель оценки термодинамического совершенства технических систем;
3. Предложенный эвристический алгоритм структурной оптимизации теплообменных связей;
4. Программный код для автоматизированного проектирования сети теплообменников, позволяющий учитывать экспертные рекомендации;
5. Дополнительные уравнения термоэкономического анализа энергопреобразующих технических систем;
6. Метод комплексной оптимизации промышленного теплотехнического и технологического оборудования при его проектировании и эксплуатации.

Практическая значимость.

Для практического использования представляют интерес:

1. Методы и средства для интеграции нестационарных тепловых потоков в технических системах;
2. Структурная и параметрическая оптимизация существующих технических систем;
3. Рабочие параметры функционирования технических систем, экспериментально определенные в процессе параметрической оптимизации;
4. Рекомендации по применению методики оценки и повышения показателей термодинамического совершенства энергопреобразующих технических систем;
5. Усовершенствованная технико-экономическая оценка технических систем.

Реализация результатов работы.

Результаты работы внедрены и используются в различных областях перерабатывающей промышленности и народного хозяйства:

— в молочном производстве при совершенствовании установок пастеризации, СПК «Детскосельский», г. Санкт-Петербург;

— в перерабатывающем производстве при подборе энергетических установок и определении оптимальных режимов эксплуатации системы энергоснабжения (ООО «Бекон») г. Тосно, Ленинградская область;

— в мясном производстве при совершенствовании линии сушки зерна на предприятии, СПК «Детскосельский», г. Санкт-Петербург;

— в строительстве при модернизации технологической линии производства по выпуску негорючей изоляции предприятия ООО «Роквул-Север», г. Выборг, Ленинградская область;

— при выполнении научно-исследовательской работы по высокотемпературному охлаждению дизелей Д-240 и Д-240Т на кафедре «Автомобили, тракторы и технический сервис» (СПбГАУ);

— в учебном процессе СПбГАУ при проведении лабораторных работ по теплотехническим дисциплинам на специально сформированной лабораторной установке.

На защиту выносятся.

1. Способ и средство для интеграции нестационарных тепловых потоков в промышленном теплотехническом и технологическом оборудовании;
2. Критерий оценки степени интеграции тепловых потоков в оборудовании;
3. Обобщенный показатель оценки термодинамического совершенства промышленного теплотехнического и технологического оборудования;
4. Предложенный алгоритм выбора эвристик структурной оптимизации теплообменных связей;
5. Метод комплексной оптимизации промышленного теплотехнического и технологического оборудования при его проектировании и эксплуатации;
6. Научно-обоснованные усовершенствования термоэкономического анализа для оценки и параметрической оптимизации промышленного теплотехнического и технологического оборудования;
7. Рекомендации по повышению показателей термодинамического совершенства энергопреобразующего промышленного оборудования.

Апробация результатов работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных международных научно-технических конференциях на кафедре «Тракторы автомобили и технический сервис» (Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 2001 – 2015 гг.); на международных научно-практических конференциях «Новые горючие и смазочные материалы с присадками» (Международная Академия Прикладных Исследований 2004 – 2014 гг.); на отраслевых научно-практических конференциях молодых специалистов ОАО «Концерн «Морское подводное оружие – Гидроприбор» (2008 – 2015 гг.); в Санкт-Петербургском научном центре РАН на совете по горению и взрыву (2013 – 2015 гг.); на международных научно-практических конференциях «Перспективные технологии и технические средства в сельскохозяйственном производстве» (Белорусский государственный аграрный технический университет, 2006 – 2014 гг.); на II Международном форуме «Инновационные технологии в сервисе» (Санкт-Петербургский государственный университет сервиса и экономики, 2010 г.); на II Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции «Актуальные проблемы морской энергетики» (Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 2013 г.).

Публикации результатов исследований.

По теме диссертации опубликовано 60 статей, в том числе 21 статья в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ для докторских диссертаций. Шесть учебно-методических пособий (общим объемом 18 п. л.). Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612919 от 29 февраля 2015 года и 3 патента на полезную модель № 157238 от 12 января 2015 года, № 155349 от 9 февраля 2015 года и 156745 от 17 февраля 2015 года.

Соответствие паспорту специальности. По тематике, методам исследования, предложенным новым научным положениям диссертация соответствует паспорту специальности научных работников 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика» по пунктам: 1 – «Разработка научных основ сбережения энергетических ресурсов в промышленных теплоэнергетических устройствах и использующих тепло системах и установках»; 2 – «Оптимизация схем энергетических установок и систем для генерации и трансформации энергоносителей, основанных на принципах их комбинированного производства»; в части пункта 3 – «Совершенствование методов расчета тепловых сетей и установок с целью улучшения их технико-экономических характеристик, экономии энергетических ресурсов»; и по пункту 5 – «Оптимизация параметров тепловых технологических процессов и разработка оптимальных схем установок, использующих тепло, с целью экономии энергетических ресурсов и улучшения качества продукции в технологических процессах».

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы (280 наименований) и четырех приложений. Содержит всего 312 страниц машинописного текста, из них 111 рисунков, 49 таблиц, 6 актов внедрения результатов научно-исследовательской работы.

Содержание работы

Во введении дана общая характеристика работы, изложено ее краткое содержание, обоснована актуальность темы диссертационного исследования. Представлена научная концепция работы, определены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы; приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены различные аспекты функционирования промышленных теплоэнергетических систем. Установлен современный уровень решения проблемы создания единой концепции их термодинамического и термоэкономического совершенствования. Для этого проанализированы работы отечественных и зарубежных авторов внесших существенный вклад в развитие теории теплообмена, классической термодинамики, тепловых двигателей, теории эксергетического анализа и методов решения проблемы интеграции тепловых потоков. Так, в частности, в области теории двигателей и их теплового баланса изучены работы В.И. Гриневецкого, Е.К. Мазинга, Н.Р. Бриллинга, А.С. Орлина, Б.С. Стечкина, А.К. Костина, А.В. Николаенко, Р.М. Петриченко, М.Р. Петриченко, Н.Х. Дьяченко, В.С. Семенова, Н.А. Иващенко, Р.З. Кавтарадзе, Б.А. Шароглазова, В.В. Эфроса, В.С. Кукиса, В.А. Бариловича и др. В области эксергетического анализа изучены работы Д.П. Гохштейна, В.М. Бродянского, Я. Шаргута, Р. Петелы, Б.С. Сажина, А.П. Булекова, А.И. Андрющенко, М.И. Щепетильникова, Я.М. Рубинштейна и др. В области интеграции тепловых потоков и пинч-анализа исследование опиралось на работы Б. Линнхоффа, Й. Клемеша, Л.Л. Товажнянского, Р. Смита, П.А. Капустенко, Л.М. Ульева, и др. Необходимые для исследования материалы по тепловому аккумулированию энергии были найдены в работах Г. Бекмана и П. Гилли, В.В. Шульгина, М.И. Куколева и др. В области оптимизации технических систем и технологических процессов исследование опиралось на труды Д. Тсатсарониса, И.Л. Лейтеса и др. Необходимый базис по техническим средствам измерения тепловых потоков составили работы А.В. Митякова, В.Ю. Митякова, С.З. Сапожникова, Н.В. Пилипенко и др. В области энергосбережения исследование опирается на работы М.П. Федорова, В.Г. Казакова, П.В. Луканина, В.В. Сергеева, В.А. Горбунова, А.Д. Ключникова, В.А. Суслова, А.Н. Коваленко, Г.В. Лепеша, Р.З. Аминова и др.

Необходимо отметить, что предлагаемая в данном исследовании концепция оценки степени термодинамического совершенства промышленных теплоэнергетических систем, входящего в них теплотехнического и технологического оборудования, была бы просто невозможна без опоры на многолетние исследования ученых МЭИ, ВлГУ, МГТУ, СПбГАУ, ИГЭУ, ЧГАУ, СПбПУ, ЮУрГУ, ВИТУ; а также ряда НИИ: ЦКТИ, КГЭУ, ЦНИДИ, ЦНИТА, ГОСНИТИ, ВИМ, ВИЭСХ, СГТУ и др. Именно анализ и обобщение результатов их работ и позволили сформулировать предлагаемый методологический подход к достижению поставленной цели из трех основных этапов:

1. Термодинамическое усовершенствование отдельных элементов промышленного теплотехнического оборудования следует проводить на основе эксергетического анализа;

2. Структурный анализ существующей или синтез новой технологических систем обеспечивается интеграцией тепловых потоков на основе пинч-анализа;

3. Улучшение термоэкономических показателей промышленного теплотехнического оборудования достигается путем параметрического совершенствования.

Таким образом, на первом этапе решается вопрос термодинамического совершенства процессов, протекающих в отдельных элементах систем (теплообменные аппараты, цилиндропоршневая группа ДВС и др.), исходя из гипотезы, что совершенство системы в целом зависит от совершенства каждого ее элемента. На втором этапе определяется степень структурного совершенства технической системы и, при необходимости, осуществляется синтез новой структуры. На третьем этапе на основе предложенных уравнений производится ее параметрическое совершенствование с помощью термоэкономических показателей.

Вторая глава посвящена вопросу совершенствования технических систем на основе энтальпийного (балансового) подхода. На примере рассмотрения теплоэнергетической системы предприятия ООО «Бекон» (г. Тосно, Ленинградская область) произведено получение данных об энергетических потоках различного теплотехнического оборудования (тепловых двигателей, когенерационных установок и др.), составлены их тепловые балансы, построены соответствующие диаграммы Сэнки. Далее, на основе решения задачи комбинаторной оптимизации, произведен подбор энергетического оборудования для обеспечения автономной работы предприятия. Затем определены оптимальные режимы работы предложенного теплотехнического оборудования для повышения ресурсосбережения. Опытным путем уточнены составляющие теплового баланса для некоторых современных бензиновых и дизельных тепловых двигателей и установлена взаимосвязь энергетических потоков на различных режимах их работы. При этом затронуты вопросы скорости выхода системы на оптимальный режим эксплуатации (предпусковой подогрев и др.).

В третьей главе произведена оценка элементов теплоэнергетических систем эксергетическим методом и разработаны мероприятия по совершенствованию составляющих элементов на основе принципов неравновесной термодинамики (энтропийного подхода).

Построены диаграммы Грассмана-Шаргута, произведено сравнение эксергетических и энтальпийных диаграмм, что наглядно позволило выявить неполноту балансового метода по сравнению с эксергетическим, так как балансовый метод не учитывает потери от термодинамического несовершенства протекания процессов.

Для примера проведено исследование внутрицилиндровых процессов (сгорания и расширения) поршневого ДВС (TDI 1,6) на основании принципов неравновесной термодинамики и составлены уравнения для рабочего тела:

$$\frac{\delta x_A}{d\varphi} = \frac{\delta A_Q + \delta A_{хим}}{B_ц \cdot Q_н \cdot \Delta\varphi} = \frac{n \cdot T_0}{B_ц \cdot Q_н} \cdot \frac{ds_{m,x}}{d\varphi}, \qquad (1)$$

$$\frac{ds_{m,x}}{d\varphi} = \frac{dQ_x}{d\varphi} \cdot \frac{1}{n \cdot \overline{T}} = \frac{dx}{d\varphi} \cdot \frac{B_ц \cdot Q_н}{n \cdot \overline{T}}, \quad (2)$$

$$\frac{\delta x_A}{d\varphi} = \frac{n \cdot T_0}{B_ц \cdot Q_н} \cdot \frac{dx}{d\varphi} \cdot \frac{B_ц \cdot Q_н}{n \cdot \overline{T}} = \frac{T_0}{\overline{T}} \cdot \frac{dx}{d\varphi}, \quad (3)$$

$$\frac{\delta x_{Ex}}{d\varphi} = \frac{dx}{d\varphi} - \frac{T_0}{\overline{T}} \cdot \frac{dx}{d\varphi} = \left(1 - \frac{T_0}{\overline{T}}\right) \cdot \frac{dx}{d\varphi}, \quad (4)$$

$$x_{Ex} = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{dx_{Ex}}{d\varphi} d\varphi, \quad (5)$$

где: n – количество рабочего тела, моль; x_A , x_{Ex} – соответственно доли эксергии и анергии; A_Q, $A_{хим}$ – соответственно термическая и химическая анергии, Дж; $Q_н$ – низшая молярная теплотворная способность топлива, Дж/моль; $B_ц$ – коэффициент использования теплоты; T_0 – температура окружающей среды, К; s – молярная энтропия, Дж/(моль·К); $\overline{T}$ – средняя температура рабочего тела на бесконечно малом угле поворота коленчатого вала $d\varphi$, К.

Установлено, что приращение анергии за счет изменения количества рабочего тела в процессе сгорания δA_q является величиной более низшего порядка, нежели приращение анергии за счет теплообмена $\delta A_{хим}$. То есть практически вся деструкция в рабочем теле обусловлена температурными градиентами, а доля потерь работоспособности рабочего тела, обусловленная химическими реакциями, протекающими в нем, незначительна (рисунок 1).

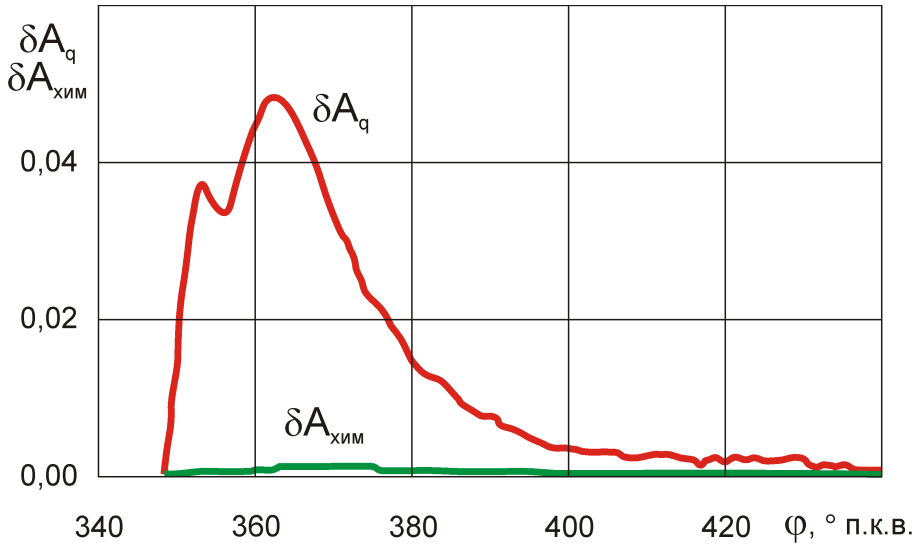


Рисунок 1. Доли анергии в процессе сгорания в цилиндре

На основании этого обосновано применение высокотемпературного охлаждения в ДВС (рисунок 2), то есть охлаждения с более высокими значениями температуры охлаждающей жидкости. Получение регулировочных характеристик дизельного двигателя при различных температурах охлаждающей жидкости с планированием трехфакторного эксперимента это подтвердило.

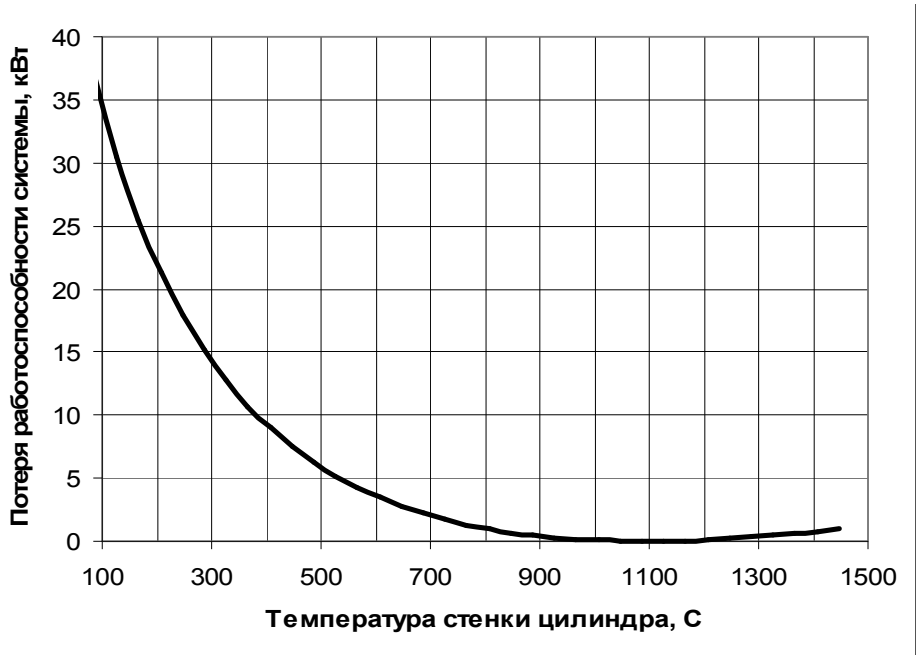


Рисунок 2. Потеря работоспособности рабочего тела в ДВС вследствие отвода теплоты в систему охлаждения

<u>В четвертой главе</u> проведена структурная оптимизация теплоэнергетических систем путем интеграции тепловых потоков на основе пинч-технологии. Для различного теплотехнического и теплового технологического оборудования (тепловых двигателей, транспортных средств и оборудования производственных предприятий) определялись горячие «*h*» и холодные «*c*» тепловые потоки (соответственно потоки, нуждающиеся в отводе и подводе теплоты). Составлены матрицы горячих потоков *H*, холодных потоков *C* и базис оригинальных температур, где $T_{г,н}$, $T_{г,к}$, $T_{х,н}$, $T_{х,к}$, – начальные и конечные температуры горячих и холодных потоков, К; $c_{р,г}$ и $c_{р,х}$ соответственно потоковые теплоемкости горячих и холодных потоков, Вт/К;

$$H = \begin{vmatrix} T_{г,н,1} & T_{г,к,1} & c_{р,г,1} \\ T_{г,н,2} & T_{г,к,2} & c_{р,г,2} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ T_{г,н,i} & T_{г,к,i} & c_{р,г,i} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ T_{г,н,n-1} & T_{г,к,n-1} & c_{р,г,n-1} \\ T_{г,н,n} & T_{г,к,n} & c_{р,г,n} \end{vmatrix} \quad C = \begin{vmatrix} T_{х,н,1} & T_{х,к,1} & c_{р,х,1} \\ T_{х,н,2} & T_{х,к,2} & c_{р,х,2} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ T_{х,н,i} & T_{х,к,i} & c_{р,х,i} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ T_{х,н,m-1} & T_{х,к,m-1} & c_{р,х,m-1} \\ T_{х,н,m} & T_{х,к,m} & c_{р,х,m} \end{vmatrix} \quad T_{H\cup C} = \begin{vmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \cdots \\ T_j \\ \cdots \\ T_{k-1} \\ T_k \end{vmatrix}$$

Сложением этих матриц получаем кусочные функции h_0 и c_0, сдвигая которые друг относительно друга в координатах «потоковая теплоемкость-температура» по оси абсцисс (рисунок 3), добиваемся нужной нам разности температур ΔТ. Данная разность необходима для обеспечения возможности работы теплообменных аппаратов в наиболее узком месте между кривыми (на пинче).

$$
h_0 = \begin{cases}
0,\ 0 \le T < T_{r,1} \\
\left(T_{r,2} - T_{r,1}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} c_{p,r,i} \Big|_{T_{r,1}}^{T_{r,2}},\ T_{r,1} \le T < T_{r,2} \\
\left(T_{r,2} - T_{r,1}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} c_{p,r,i} \Big|_{T_{r,1}}^{T_{r,2}} + \left(T - T_{r,2}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} c_{p,r,i} \Big|_{T_{r,2}}^{T_{r,3}},\ T_{r,2} \le T < T_{r,3} \\
\dots \\
\sum_{1}^{j-1} \left[\left(T_{r,j-1} - T_{r,j-2}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} c_{p,r,i} \Big|_{T_{r,j-1}}^{T_{r,j}} \right] + \left(T - T_{r,j-1}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} c_{p,r,i} \Big|_{T_{r,j-1}}^{T_{r,j}},\ T_{r,j-1} \le T < T_{r,j} \\
\sum_{j=1}^{j} \left[\left(T_{r,j} - T_{r,j-1}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} c_{p,r,i} \Big|_{T_{r,j}}^{T_{r,j+1}} \right] + \left(T - T_{r,j}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} c_{p,r,i} \Big|_{T_{r,j}}^{T_{r,j+1}},\ T_{r,j} \le T < T_{r,j+1} \\
\sum_{j=1}^{j+1} \left[\left(T_{r,j+1} - T_{r,j}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} c_{p,r,i} \Big|_{T_{r,j+1}}^{T_{r,j+2}} \right] + \left(T - T_{r,j+1}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} c_{p,r,i} \Big|_{T_{r,j+1}}^{T_{r,j+2}},\ T_{r,j+1} \le T < T_{r,j+2} \\
\dots \\
\sum_{j=1}^{j=k-1} \left[\left(T_{r,j} - T_{r,j-1}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} c_{p,r,i} \Big|_{T_{r,j-1}}^{T_{r,j}} \right] + \left(T - T_{r,j-1}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} c_{p,r,i} \Big|_{T_{r,k-1}}^{T_{r,k}},\ T_{r,k-1} \le T < T_{r,k} \\
\sum_{j=1}^{j=k} \left[\left(T_{r,j} - T_{r,j-1}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} c_{p,r,i} \Big|_{T_{r,j-1}}^{T_{r,j}} \right],\ T_{r,k} \le T
\end{cases} \tag{6}
$$

$$
c_0 = \begin{cases}
0,\ 0 \le T < T_{x,1} \\
\left(T_{x,2} - T_{x,1}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} c_{p,x,i} \Big|_{T_{x,1}}^{T_{x,2}},\ T_{x,1} \le T < T_{x,2} \\
\left(T_{x,2} - T_{x,1}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} c_{p,x,i} \Big|_{T_{x,1}}^{T_{x,2}} + \left(T - T_{x,2}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} c_{p,x,i} \Big|_{T_{x,2}}^{T_{x,3}},\ T_{x,2} \le T < T_{x,3} \\
\dots \\
\sum_{1}^{j-1} \left[\left(T_{x,j-1} - T_{x,j-2}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} c_{p,x,i} \Big|_{T_{x,j-1}}^{T_{x,j}} \right] + \left(T - T_{x,j-1}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} c_{p,x,i} \Big|_{T_{x,j-1}}^{T_{x,j}},\ T_{x,j-1} \le T < T_{x,j} \\
\sum_{j=1}^{j} \left[\left(T_{x,j} - T_{x,j-1}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} c_{p,x,i} \Big|_{T_{x,j}}^{T_{x,j+1}} \right] + \left(T - T_{x,j}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} c_{p,x,i} \Big|_{T_{x,j}}^{T_{x,j+1}},\ T_{x,j} \le T < T_{x,j+1} \\
\sum_{j=1}^{j+1} \left[\left(T_{x,j+1} - T_{x,j}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} c_{p,x,i} \Big|_{T_{x,j+1}}^{T_{x,j+2}} \right] + \left(T - T_{x,j+1}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} c_{p,x,i} \Big|_{T_{x,j+1}}^{T_{x,j+2}},\ T_{x,j+1} \le T < T_{x,j+2} \\
\dots \\
\sum_{j=1}^{j=k-1} \left[\left(T_{x,j} - T_{x,j-1}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} c_{p,x,i} \Big|_{T_{x,j-1}}^{T_{x,j}} \right] + \left(T - T_{x,j-1}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} c_{p,x,i} \Big|_{T_{x,k-1}}^{T_{x,k}},\ T_{x,k-1} \le T < T_{x,k} \\
\sum_{j=1}^{j=k} \left[\left(T_{x,j} - T_{x,j-1}\right) \cdot \sum_{i=1}^{n} c_{p,x,i} \Big|_{T_{x,j-1}}^{T_{x,j}} \right],\ T_{x,k} \le T
\end{cases} \tag{7}
$$

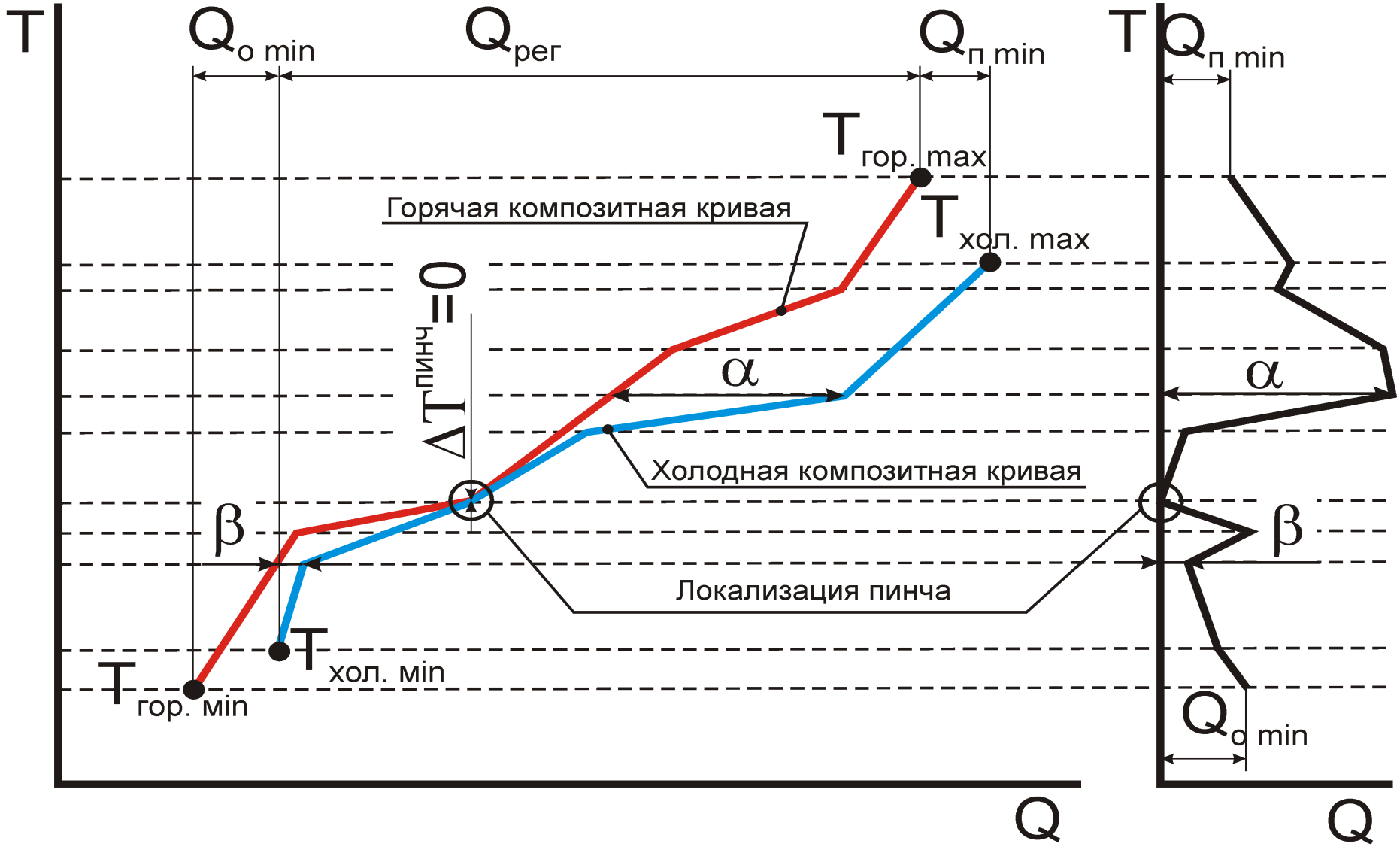


Рисунок 3. Пинч-анализ технической системы

Были введены «критерий степени интеграции тепловых потоков» и «показатель термодинамического совершенства» технической системы.

Степень интеграции тепловых потоков это отношение теплоты интеграции к ее максимально возможному значению для данной технической системы. В существующих системах критерий определяется как:

$$\chi = \frac{Q_{р\,(\Delta T_{пинч})}}{Q_{р\ (\Delta T_{пинч}=0)}}, \tag{8}$$

а для вновь проектируемых систем:

$$\chi = \frac{\left|\sum_{i=1}^{i=m} h\right| + \left|\sum_{i=1}^{i=n} c\right| - |Q_п| - |Q_о|}{2 \cdot Q_{р\ (\Delta T_{пинч}=0)}}, \tag{9}$$

где $Q_р$ — теплота регенерации, Σh и Σc — соответственно суммы теплот горячих и холодных потоков, $Q_п$ и $Q_о$ — соответственно теплоты горячих и холодных утилит (внешних источников). Цифра 2 в знамнателе учитывает то, что теплота регенерации имеет место как для горячих, так и для холодных потоков.

Величина данного критерия может варьироваться от нуля (отсутствие интеграции) до единицы (полная интеграция). Однако полная интеграция практически недостижима, так как при этом разность температур при теплообмене должна равняться нулю.

Обобщенный показатель оценки термодинамического совершенства технических систем в аддитивной форме учитывает как степень интеграции тепловых потоков χ, так и их термодинамическое совершенство η_{Ex} (эксергетический КПД):

$$\eta_{ТДС} = \xi \cdot \chi + \xi_{Ex} \cdot \eta_{Ex}, \tag{10}$$

где ξ и ξ_{Ex} — весовые коэффициенты значимости структурного совершенства системы и термодинамического совершенства протекающих в ней процессов.

В первом приближении допустимо полагать равными ценности структурных и термодинамических показателей (11):

$$\eta_{тдс} = \frac{\chi + \eta_{Ex}}{2}. \tag{11}$$

На основе этих критериев и показателей предлагается оценивать термодинамическое совершенство системы предприятия включающей теплотехническое и технологическое оборудование.

После определения целевых показателей χ и $\eta_{Ex,}$ следует синтез теплообменных связей и совершенствование структуры предприятия. Машинные методы, реализующие известные NLP, MNLP и другие поисковые алгоритмы, исключают участие проектировщика в создании теплообменной сети в процессе поиска решения, а главное – требуют значительных вычислительных ресурсов и имеют высокую стоимость самих расчетных программ. Кроме того, в них затруднено использование рекомендаций из практического опыта экспертов в этой области.

Существующие эвристические методы лишены указанных недостатков, но труднее поддаются программной реализации и не всегда приводят к одному конкретному оптимальному решению.

Предложен эвристический алгоритм структурной оптимизации тепло-

обменных связей (рисунки 5 - 7). Его суть в том, что просчитываются возможные интеграции всех разделенных на пинче потоков и проектировщику предлагаются комбинации возможных теплообменных связей, не изменяющие целевых значений соответствующих утилит. Причем теплота интеграции для каждой комбинации потоков вначале задается максимальной, а затем варьируется в соответствии с условием целевых значений внешних утилит. Число повторений этого цикла равно количеству входящих в пинч потоков.

Программный код, реализующий описанный алгоритм выполнен на языке VBA, реализован в среде Microsoft Excel 2003 и зарегистрирован (свидетельство № 2015612919). Он позволяет вести синтез и модификацию теплообменной сети в автоматическом режиме (без непосредственного участия проектировщика) и полуавтоматическом режиме (проектировщик сам оценивает теплообменные связи).

Выбор алгоритмов интеграции осуществляется на основе соотношения потоковых теплоемкостей, табл. 1 и рисунок 3:

$$\frac{d\left[T(h)-T(c)\right]}{dq}=\frac{1}{c_{p,г}}-\frac{1}{c_{p,x}}=\frac{c_{p,x}-c_{p,г}}{c_{p,г}\cdot c_{p,x}};\quad \left|\forall q\in\left[q\left(T_{x,\min}\right);q\left(T_{x,\max}\right)\right]\right. \qquad (12)$$

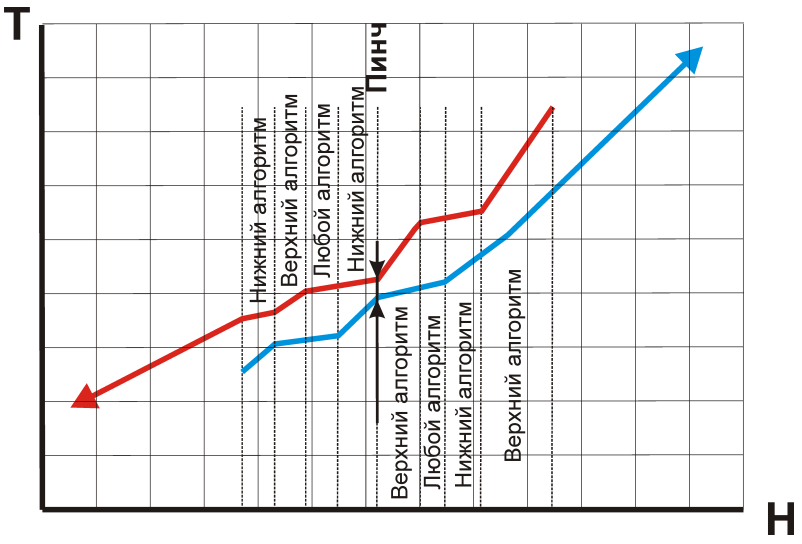


Рисунок 4. К выбору алгоритма интеграции потоков

Таблица 1. Выбор алгоритмов интеграции в зависимости от расположения диапазонов и соотношения потоковых теплоемкостей

Соотношение теплоемкостей	Расположение диапазонов интеграции	
	Выше пинча	Ниже пинча
$\frac{d\left[T(h)-T(c)\right]}{dq}>0$	Верхний алгоритм	Нижний алгоритм
$\frac{d\left[T(h)-T(c)\right]}{dq}<0$	Нижний алгоритм	Верхний алгоритм
$\frac{d\left[T(h)-T(c)\right]}{dq}=0$	Любой алгоритм	

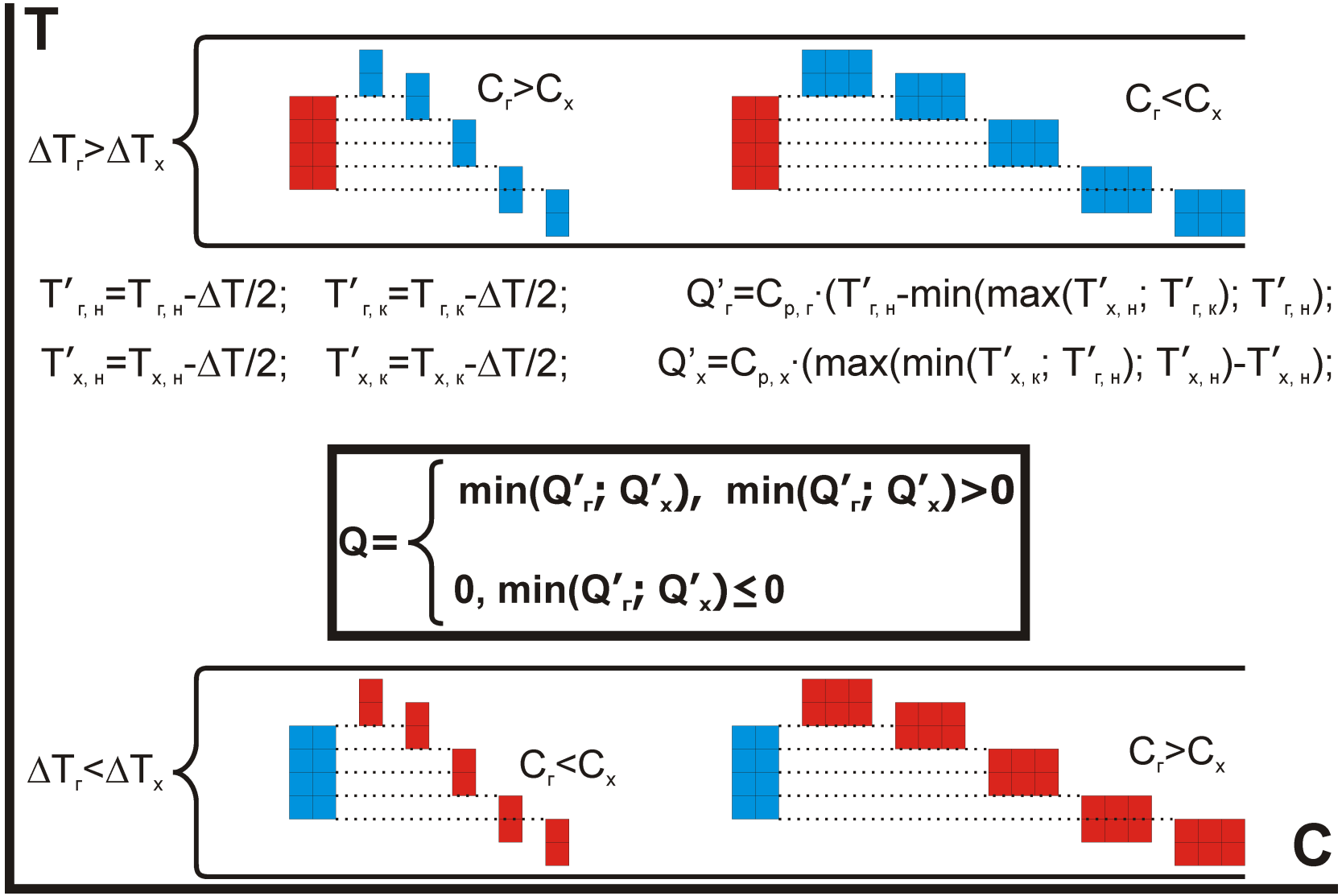


Рисунок 5. Определение возможной теплоты интеграции
между двумя различными стационарными тепловыми потоками.

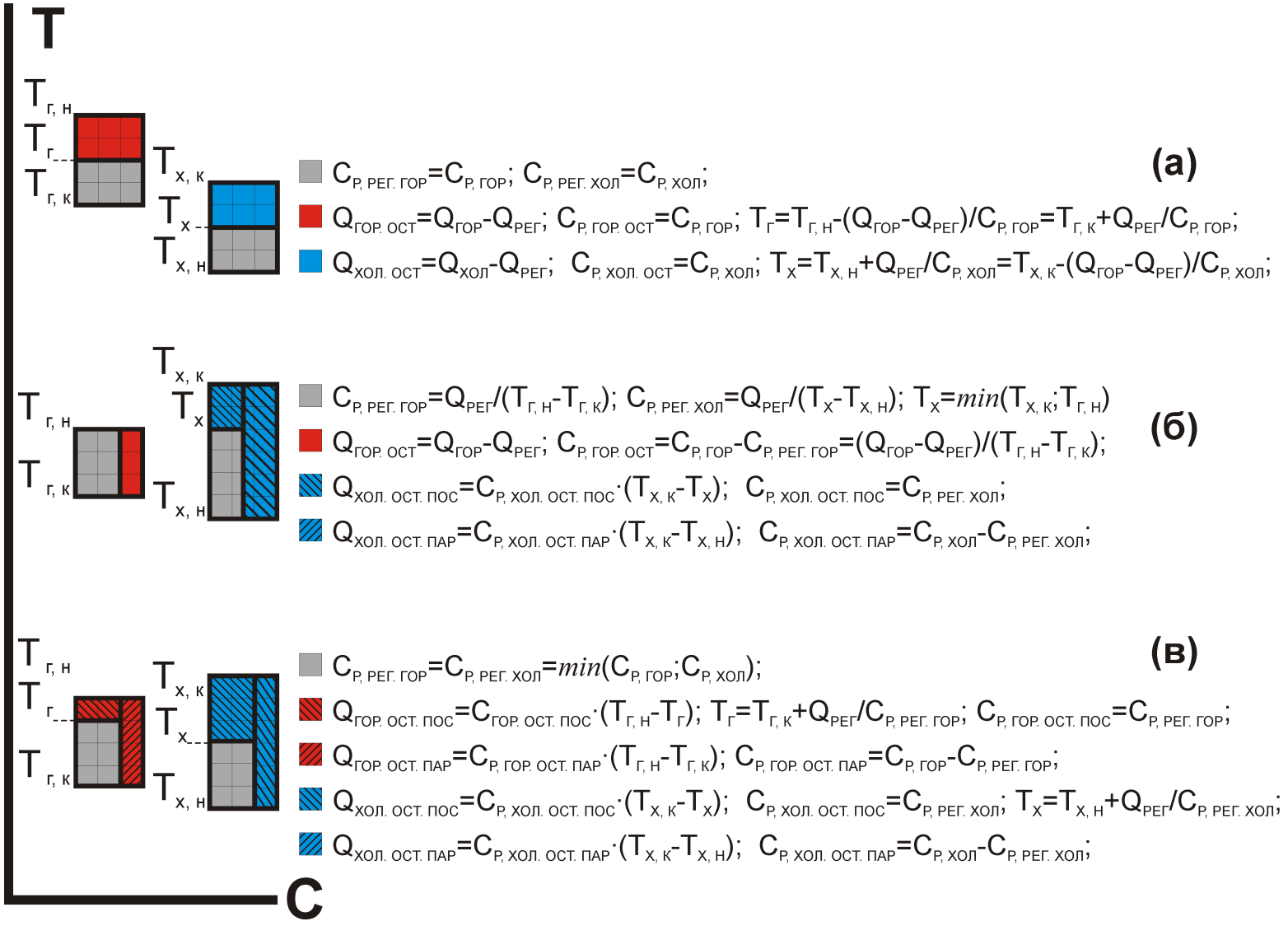


Рисунок 6. Частные случаи интеграции стационарных тепловых потоков выше пинча и определение возможной теплоты интеграции: а – последовательная интеграция; б – параллельная интеграция; в – парапараллельная интеграция.

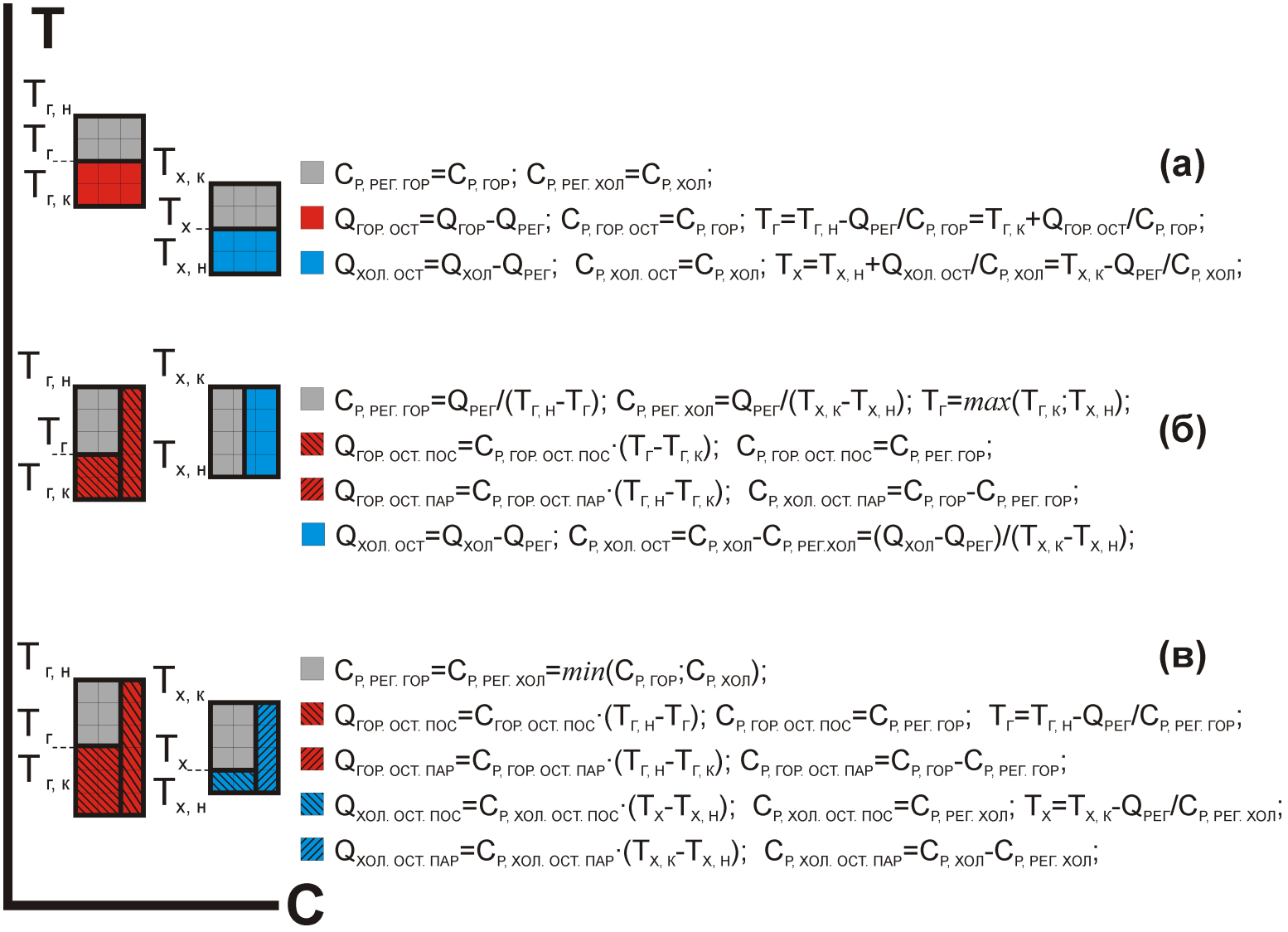


Рисунок 7. Частные случаи интеграции стационарных тепловых потоков ниже пинча и определение возможной теплоты интеграции: а – последовательная интеграция; б – параллельная интеграция; в – парапараллельная интеграция.

Для проведения натурных испытаний была создана экспериментальная установка, позволяющая моделировать интеграцию десяти различных тепловых потоков (рисунок 8). Проведенные эксперименты подтвердили справедливость теоретических положений диссертационного исследования.

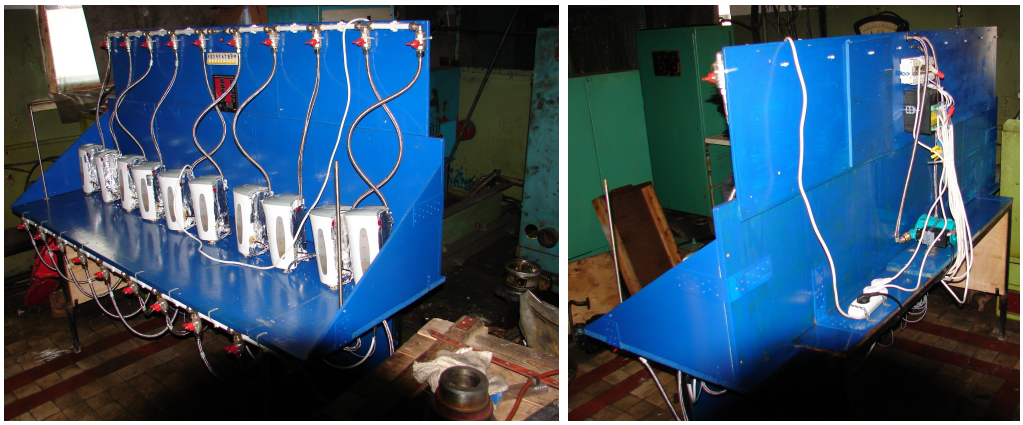


Рис. 8. Экспериментальная установка для натурных испытаний.

Созданная компьютерная программа «Пинч-анализ и теплообменная сеть» была апробирована: при структурной оптимизации утилизационного модуля когенерационных установок JANBAHER JMS-612 GS-N.L. и JMS-616 GS-N.L.; при оптимизации теплообменной сети предприятия по выпуску негорючей изоляции ООО «Роквул-Север» (г. Выборг, ЛО); при совершенствовании технологии получения сахара (совместно с ООО «Сельхозресурс-КВМ»); при структурной оптимизации сахарного завода (г. Сусс, Республика Тунис).

К особенностям рассматриваемых промышленных теплоэнергетических систем относятся такие свойства как цикличность и непрерывность. В связи с этим возникла необходимость решения задачи интеграции нестационарных потоков (рисунок 9).

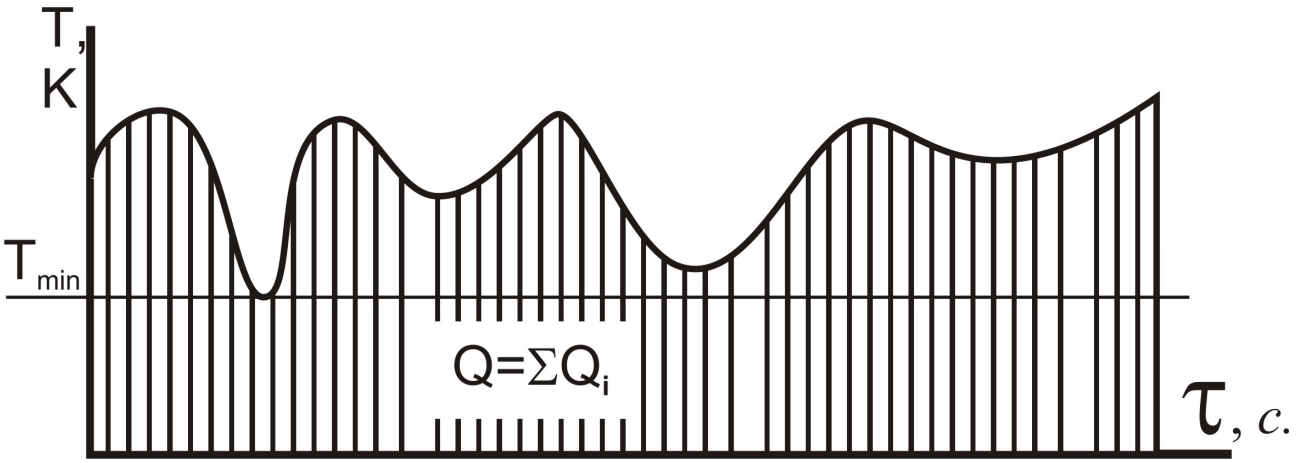


Рисунок 9. Нестационарный тепловой поток на входе в преобразователь

Для решения этой задачи предложено техническое устройство (рисунок 10), позволяющее преобразовать нестационарный поток (рисунок 9) в несколько стационарных потоков (рисунок 11) за счет накопления и отдачи теплоты аккумуляторами фазового перехода при постоянной температуре, определяемой температурой плавления используемого аккумулирующего вещества.

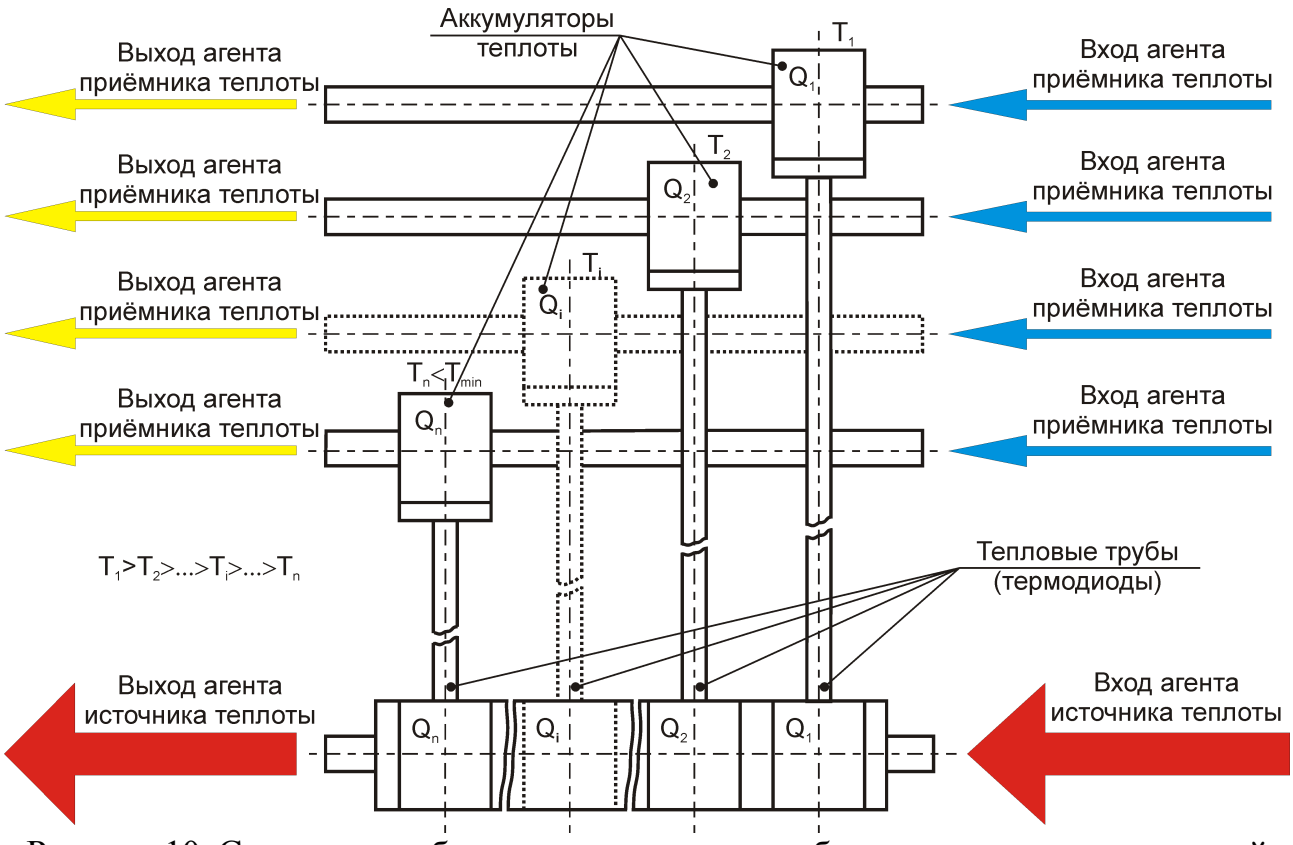


Рисунок 10. Схема теплообменного аппарата, преобразующего нестационарный поток в несколько стационарных (Патент РФ на полезную модель № 2015100522)

На основе проведенных расчетов были предложены конкретные технические решения по интеграции тепловых потоков для ряда производств различного назначения. К примеру, интеграцию теплоты в ДВС предлагается осуществлять на основе термохимической конверсии топлива.

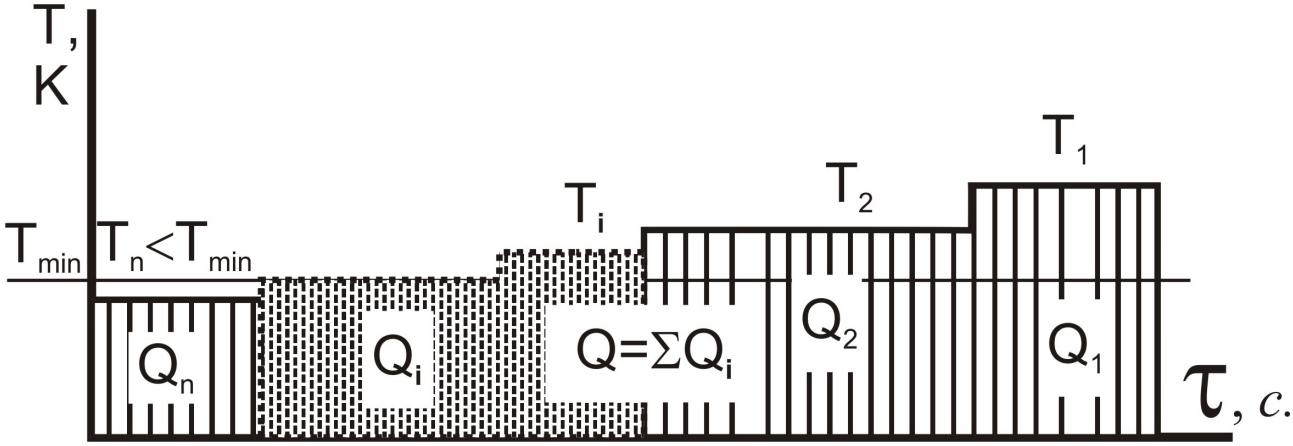


Рисунок 11. Стационарные тепловые потоки на выходе из преобразователя

<u>В пятой главе</u> осуществлена параметрическая оптимизация технических систем на основе термоэкономического подхода. Для каждого элемента системы, группы элементов, а также для всей системы в целом составлено уравнение затрат:

$$\sum\left(c'_{m,k}\cdot Ex'_{m,k}\right)+\sum\left(c'_{w,k}\cdot Ex'_{w,k}\right)+\sum\left(c'_{q,k}\cdot Ex'_{q,k}\right)+\ldots+Z'_k=$$
$$=\sum\left(c''_{m,k}\cdot Ex''_{m,k}\right)+\sum\left(c''_{w,k}\cdot Ex''_{w,k}\right)+\sum\left(c''_{q,k}\cdot Ex''_{q,k}\right)+\ldots+Z''_k \qquad (13)$$

где: $c'_{m,k}$ $(c''_{m,k})$, $c'_{w,k}$ $(c''_{w,k})$ и $c'_{q,k}$ $(c''_{q,k})$ — стоимости единиц эксергии входных (выходных) компонентов k-го элемента соответственно массы, механической работы и теплоты, руб/Дж; $Ex'_{m,k}$ $(Ex''_{m,k})$, $Ex'_{w,k}$ $(Ex''_{w,k})$ и $Ex'_{q,k}$ $(Ex''_{q,k})$ — значение эксергии входных компонентов k-го элемента соответственно массы, механической работы и теплоты, Дж; Z'_k и Z''_k — соответственно капитальные затраты на покупку k-ого элемента системы и его остаточная стоимость, руб.

Когда конечный продукт представлен одной позицией уравнение (13) разрешается относительно удельной стоимости эксергии продукта. Если выпускается два и более наименования конечных продуктов, или в процессе производственного цикла осуществляется отбор промежуточных продуктов, то возникающий вопрос определения себестоимости продукции предлагается решать с помощью дополнительных уравнений (14), увязывающих приведенные стоимости единицы эксергии:

$$\left.\begin{aligned} c_{m,k} &= c''_{m,k} / \eta_{m\to El} + C_{m\to El} / Ex''_{m,k} \\ c_{w,k} &= c''_{w,k} / \eta_{w\to El} + C_{w\to El} / Ex''_{w,k} \\ c_{q,k} &= c''_{q,k} / \eta_{q\to El} + C_{q\to El} / Ex''_{q,k} \end{aligned}\right\} \; c_{m,k} = c_{w,k} = c_{q,k} \qquad (14)$$

где: $c_{m,k}$, $c_{w,k}$, и $c_{q,k}$, — соответственно приведенные стоимости единицы эксергии массы, теплоты и работы выходных потоков k-го элемента, руб/Дж; $C_{e\to El}$, $C_{w\to El}$, и $C_{q\to El}$, — стоимости капитальных затрат соответствующих преобразователей в электрическую энергию, руб/Дж.

Предложено проводить определение себестоимости готовой продукции, основываясь на равенстве стоимостей эксергии всех продуктов, приведенных к одному, наиболее ценному (стоимости электрической энергии, например).

Для приведения стоимостей предложены специальные (добавочные) уравнения термоэкономического анализа (14).

Режимы работы и рабочие параметры системы также способны влиять на себестоимость продукции. Задача отыскания оптимальных режимов и параметров работы всех элементов системы представляет собой заключительный этап методики глобальной оптимизации производства. Он реализуется путем решения экстремальных задач методом неопределенных коэффициентов Лагранжа. Уравнениями связи при этом являются зависимости рабочих параметров от режима работы системы.

Для ряда когенерационных установок отечественного и зарубежного производства были определены оптимальные рабочие параметры и режимы функционирования. Сделано заключение о наблюдаемом несовпадении энергетического и экономического оптимума, обусловленного, как правило, взаимообратными функциями стоимостей энергетических и капитальных затрат в зависимости от производства энтропии и степени неравновесности протекающих процессов.

Шестая глава иллюстрирует применение предложенной концепции для повышения ресурсосбережения как для проектируемых, так и для существующих технических систем. Рассмотрены сахарные заводы (технологии) в России и Тунисе, пищевая технология производства мясных изделий, отече

ственная когенерационная установка МТЭС 100/150, а также бензиновый ДВС 4Ч10/9,2. Решение программы «Пинч-анализ и теплообменная сеть» (рисунок 12) технически нереализуемо с помощью прямой трансляции теплоты по теплообменной связи 1 от отработавших газов ДВС в камеру сгорания. Для разрешения выявленного противоречия предложено осуществить процесс термохимической конверсии топлива (рисунок 13).

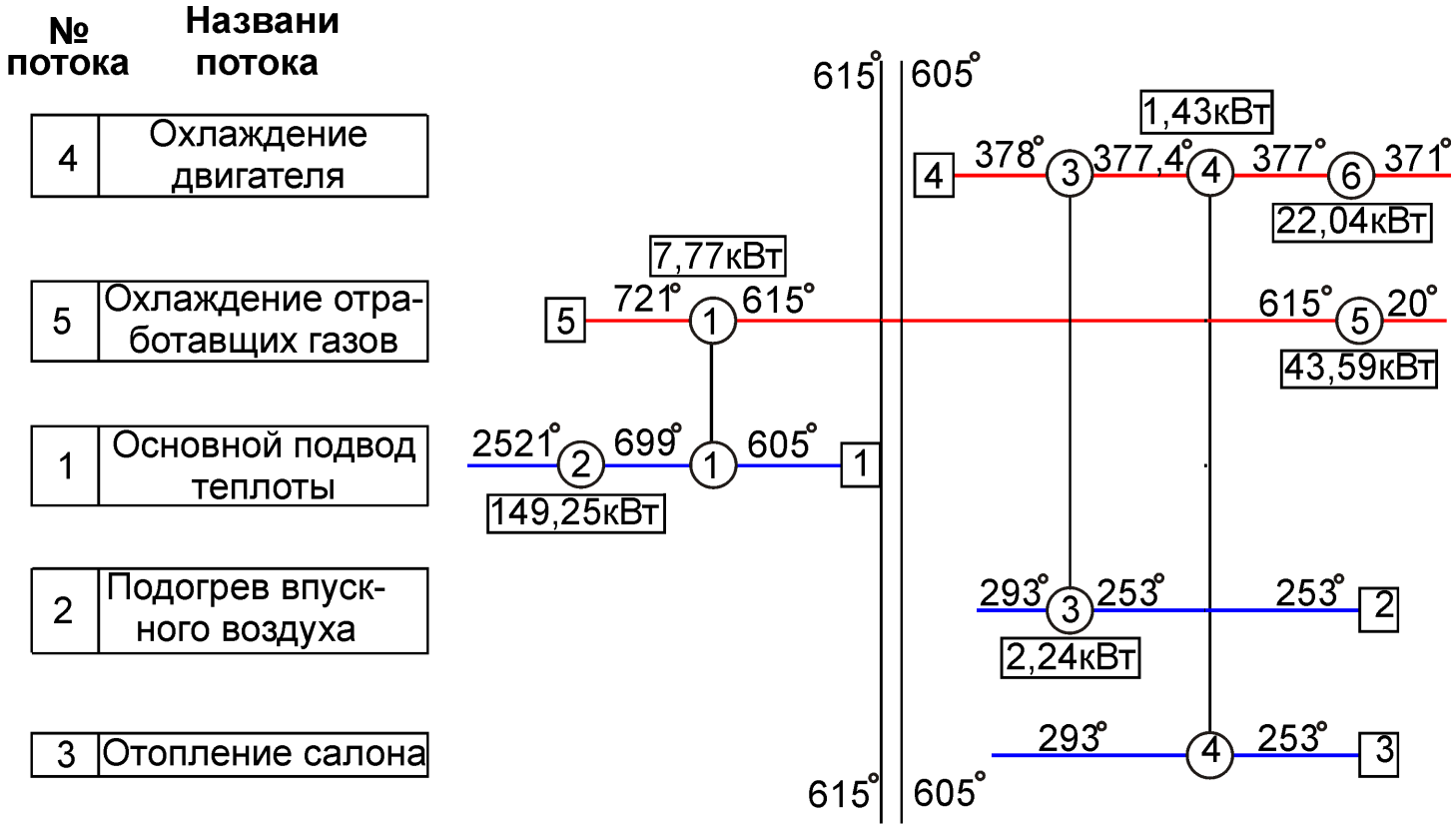


Рисунок 12. Схема теплообменной сети

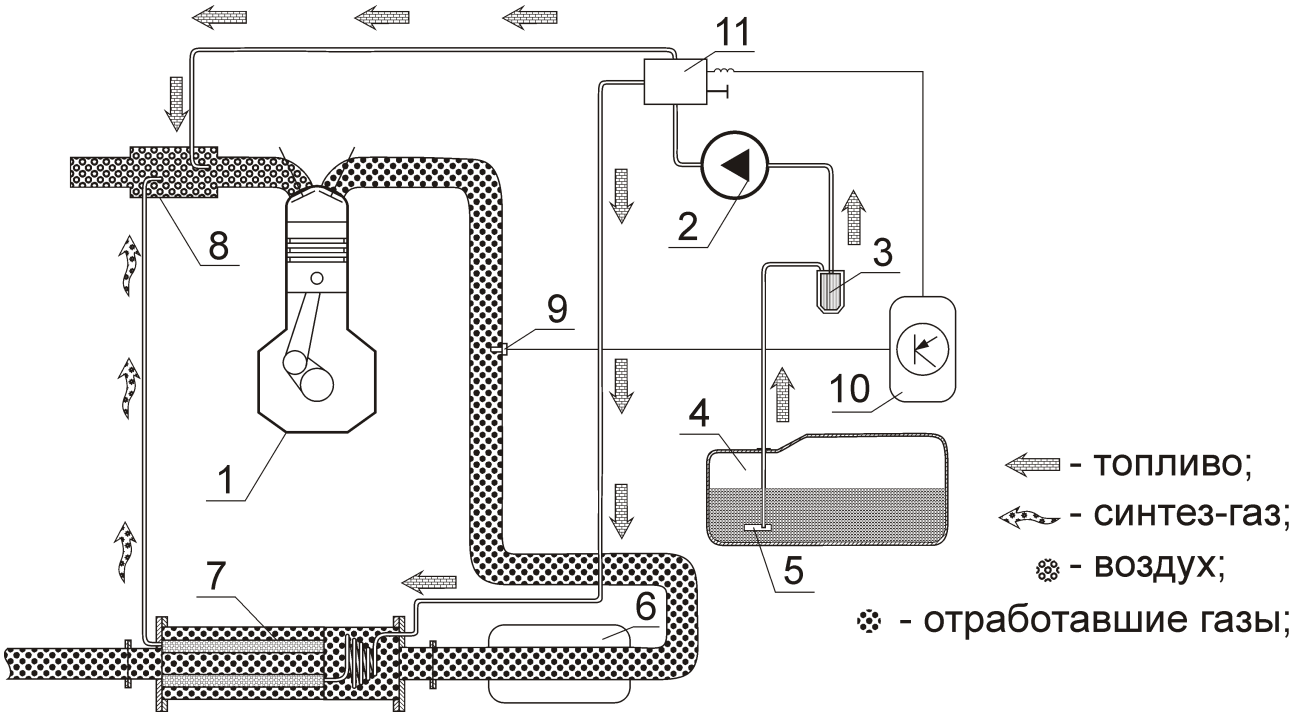


Рисунок 13. Система питания ДВС с термохимическим конвертором: 1 – ДВС (ЗМЗ.513.10); 2 – топливный нсос; 3 – фильтр тонкой очистки топлива; 4 – топливный бак; 5 – топливозаборник с фильтром; 6 – катализатор; 7 – термохимический конвертор; 8 – дозирующее устройство; 9 – датчик температуры отработавших газов; 10 – ЭБУ; 11 – электромагнитный клапан.

В заключении обобщены результаты исследования, сделаны выводы и даны рекомендации по их практическому применению.

Предложенный концептуальный подход позволяет:

- по результатам анализа современных технологий производственных и перерабатывающих предприятий различных отраслей установить взаимосвязи между технологическими потоками энергии и вещества в процессе функционирования промышленных теплоэнергетических систем при полной или частичной нагрузке;

- уточнить составляющие теплового баланса энергообменных процессов на номинальных режимах для средств транспорта, а также для различных когенерационных установок;

- определить основные направления улучшения показателей теплотехнического и теплового технологического оборудования. Для структурных показателей это: интеграция технологических потоков теплоты в технических системах; создание тепловых связей с оптимальными нагрузками на теплообменные аппараты; совершенствование конструкций на основе предложенной степени интеграции теплоты и целевых показателей пинч-технологии. Для параметрических показателей это: совершенствование конструкций на основе принципов неравновесной термодинамики для отдельных элементов технических систем с наибольшей деструкцией; совершенствование режимов работы на основе термоэкономических показателей;

В разработанном эвристическом алгоритме предложен порядок выбора эвристик в ходе поиска решения, а также конкретные зависимости для

определения значений показателей теплообменных связей в процессе структурной оптимизации промышленных предприятий. Этим достигнуто качественное улучшение процесса проектирования теплообменных сетей и интеграции тепловых потоков за счет ускорения работы поискового алгоритма путем сужения области поиска оптимальных решений;

Разработан способ интеграции нестационарных тепловых потоков путем их предварительной декомпозиции и преобразования в несколько стационарных с применением теплового аккумулирования. Для реализации предложено устройство преобразования и декомпозиции (Патент РФ на полезную модель № 2015100522).

Создана и зарегистрирована программа «Пинч-анализ и теплообменная сеть» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612919) для определения целевых показателей пинч-анализа, построения композитных кривых и автоматизированного выбора теплообменных связей при проектировании теплообменных сетей. Она позволяет вести синтез и модификацию теплообменной сети в автоматическом и полуавтоматическом режиме для обеспечения возможности учета экспертных рекомендаций.

В качестве примеров применения концепции выполнена структурная оптимизация следующих технических систем, технологий и устройств: технологии получения сахара; теплового двигателя; пищевой технологии производства мясных изделий, предприятия по выпуску негорючей строительной теплоизоляции.

Даны рекомендации по включению различных тепловых двигателей в технологию производства мясных изделий вновь проектируемого предприятия. Показаны пути интеграции этих двигателей с конкретными техническими решениями. Так, теплота системы охлаждения и теплота отработавших газов двигателя используются в такой технологической операции для варки полуфабрикатов.

Параметрическая оптимизация осуществлена, для примера, на газопоршневых когенерационных установках с тепловыми двигателями. На основе термоэкономического подхода с предложенными дополнительными уравнениями были определены оптимальные параметры эксплуатации когенерационных установок, а также выявлены места, где происходит деструкция энергии, обуславливающая наибольшую потерю денежных средств. Установлено, что такие места локализуются в устройствах преобразования энергии, именно в тепловом двигателе, а не в утилизационном модуле и не в теплообменных устройствах.

Разработанная методика термодинамического совершенства позволяет оценивать, сравнивать и улучшать технические системы на основе предложенной степени интеграции тепловых потоков, термоэкономических показателей и комплексного показателя термодинамического совершенства системы, учитывающего структурное и параметрическое совершенство.

Выработаны следующие рекомендации по повышению показателей термодинамического совершенства энергопреобразующих систем:

— устранение потерь от несовершенства протекания процессов и снижение деструкции энергии на основе принципов неравновесной термодинамики в отдельных системных элементах конструкции;

— увеличение степени интеграции теплоты путем структурных преобразований системы на основе пинч-технологии;

— улучшение термоэкономических показателей с учетом реальной эффективности энергопреобразующих устройств технической системы.

Усовершенствована термоэкономическая методика оценки промышленных теплоэнергетических систем путем научно-обоснованного введения полученных дополнительных уравнений удельной стоимости эксергии промежуточных и конечных продуктов производства, что позволяет учитывать эффективность преобразования различных форм энергии. На ее основе был проведен термоэкономический анализ энергопреобразующих систем различных предприятий производства и переработки сельскохозяйственной продукции.

ВЫВОДЫ:

1) Выявлены критерии оценки совершенства технических систем: эксергетический КПД; степень интеграции теплоты; удельная стоимость эксергии конечных продуктов. На их основе разработан обобщенный показатель оценки термодинамического совершенства технических систем. Для когенерационных установок данный показатель составил 0,852, для технологии производства сахара 0,83, для пищевой технологии производства мясных изделий 0,95;

При структурной оптимизации сахарного производства на ООО «Сельхозресурс-КМВ» (Ставропольский край, г. Ессентуки) достигнуто снижение энергопотребления технологического процесса на 14,8% и экономических затрат по отношению к аналогичному периоду предыдущего года на 10,2%. Применение рекомендаций данного исследования для сахарного завода в Республике Тунис привело к снижению энергопотребления на 17%.

Для повышения степени интеграции тепловых потоков предложено включение в структуру сахарного завода газотурбинной установки GT10 (ABB Stal) с целью покрытия потребностей в теплоте (т.е. внешних горячих утилитах). При этом была полностью покрыта потребность в горячих источниках теплоты (44394 кВт), а потребность в холодных стоках (16932 кВт) увеличилась до 17538 кВт. Степень интеграции тепловых потоков повысилась с 0,87 до 0,99.

2) Предложен метод комплексной оптимизации систем промышленного теплотехнического и технологического оборудования, включающий три основных этапа реализации. Сначала, на основе закономерностей неравновесной термодинамики, совершенствуются параметры каждого отдельного элемента системы. Затем, с помощью предложенного алгоритма выбора теплообменных связей для пинч-технологии, оптимизируется структура системы в целом. На заключительном этапе, с использованием предложенных дополнительных уравнений термоэкономического анализа, определяются оптимальные регулировочные рабочие параметры системы и осуществляется ее параметрическая оптимизация.

3) На основе пинч-технологии решена задача структурной оптимизации технической системы с транспортным бензиновым двигателем 4Ч10/9,2. Для обеспечения возможности интеграции теплоты предложено использовать процессы термохимической конверсии топлив. Это позволило снизить потери теп-

лоты на номинальном режиме в окружающую среду на 15 %, что соответствует улучшению экономичности транспортного средства с двигателем 4Ч10/9,2 на 4,5 %.

4) При структурной оптимизации пищевой технологии производства мясных изделий получены показатели термодинамического совершенства: потребность в горячих утилитах 253 кВт, потребность в холодных утилитах 77 кВт при общей теплоте интеграции 2304 кВт.

Для включения рекомендованы: бензиновый ДВС мощностью Ne = 109,7 кВт, атмосферный дизель без наддува мощностью Ne = 170,4 кВт или форсированный дизель с наддувом мощностью Ne = 230 кВт. Для варианта функционирования бензинового ДВС мощностью Ne = 109,7 кВт в составе технологической линии производства мясных изделий определены целевые значения интеграции тепловых потоков. В результате была полностью покрыта потребность в горячих источниках теплоты за счет теплоты, отводимой через систему охлаждения и выпуска отработавших газов. Эта теплота, полностью расходуясь, покрывает только часть тепловых потребностей одной из технологической операций. Потребность в холодных внешних утилитах увеличилась до 168,7 кВт, а степень интеграции тепловых потоков повысилась до 0,99.

5) Для когенерационной установки JENBACHER шестого модельного ряда JMS 612 GS-B.L были получены следующие оптимальные регулировочные параметры: нагрузка 96,2 %, частота вращения коленчатого вала 1837 мин$^{-1}$, угол опережения зажигания 26,2 град. п.к.в., температура наддувочного воздуха 177,2°С, температура охлаждающей жидкости 117,5°С. При этом удельная стоимость эксергии электрической энергии составит 0,188 руб/МДж, а удельная стоимость эксергии теплоты 0,101 руб/МДж.

Для отечественной установки МТЭС-100/150 в процессе параметрической оптимизации экспериментально получены следующие результаты: неприведенная удельная стоимость эксергии равна c = 0,435 руб/МДж; приведенная к электроэнергии удельная стоимость эксергии, (с учетом эксергетического КПД преобразователя на основе машины Стирлинга) составила c = 0,519 руб/МДж; неприведенная удельная стоимость теплоты составляет 0,074 руб/МДж; приведенная к электрической энергии удельная стоимость теплоты 0,089 руб/МДж. Стоимость же электрической энергии от когенерационной установки, когда теплота не приведена к электроэнергии составит 0,435 руб/МДж, а в случае приведения 0,519 руб/МДж.

В утилизационном модуле рассматриваемых энергетических установок места деструкции энергии, обуславливающие наибольшие потери денежных средств, наблюдаются в газоводяных теплообменных аппаратах отработавших газов 9,6% и охладителях наддувочного воздуха – 0,5%.

6) Для бензинового ДВС 4Ч10/9,2 без интеграции теплоты при эксергетическом КПД 0,38 обобщенный показатель термодинамического совершенства составил 0,19. После термодинамического совершенствования только за счет структурной оптимизации при степени интеграции теплоты 0,97 при эксергетическом КПД 0,397 обобщенный показатель термодинамического совершенства повысился до 0,684.

В пищевой технологии производства мясных изделий после включения в нее теплового ДВС и полной интеграции теплоты (степень интеграции теплоты 1) и эксергетическом КПД производства 0,75 (энергоемкость продукции 417,6 кДж/кг), обобщенный показатель термодинамического совершенства всей системы составил 0,87.

Для когенерационной установки МТЭС-100/150 при полной интеграции теплоты (степень интеграции равна 1), и эксергетическом КПД 0,852, обобщенный показатель термодинамического совершенства всей системы составил 0,93.

7) На предприятии СПК «Детскосельский» с помощью усовершенствованной методики термоэкономического анализа было достигнуто снижение энергопотребления технологического процесса на 17,3% и экономических затрат по отношению к тому же периоду предыдущего года на 12,8%.

8) Разработанные и принятые мероприятия по оптимизации структуры и параметров системы автономного энергетического оборудования для ООО «Бекон» (г. Тосно, Ленинградская обл.), позволили снизить энергопотребление технологического процесса на 15,7% и экономические затраты, по отношению к тому же периоду предыдущего года, на 7,7%.

9) На основе изложенной в данной работе концепции совершенствования промышленного теплотехнического и технологического оборудования путем структурной и параметрической оптимизации в качестве направления для дальнейших исследований научный и практический интерес представляет создание алгоритма и программного продукта синхронного структурно-параметрического синтеза технических систем.

Список работ опубликованных автором по теме диссертации.
Ведущие рецензируемые научные журналы из перечня ВАК РФ.

1. Агапов Д.С. Концепция термодинамического совершенствования энергоустановок. / Д. С. Агапов // Известия СПбГАУ. – 2011 г. – №23. – С. 367–371.
2. Агапов Д.С. Методика проведения пинч-анализа. / Д. С. Агапов // Известия СПбГАУ. – 2013. – №32. – С. 247–256.
3. Агапов Д.С. Моделирование процессов предпусковой тепловой подготовки дизелей с использованием аккумулированной энергии. / Д. С. Агапов, А.П Картошкин //Журнал Известия Международной академии аграрного образования – СПб.: Изд-во СПбГАУ. – 2013. – №19. – С. 45–48.
4. Агапов Д. С. Расчет потребности предприятия в энергетическом оборудовании. / Д. С. Агапов, А.П. Картошкин // Журнал Сельский механизатор. – 2015. – №5. С. 26–27, 31.
5. Агапов Д. С. Оптимальные режимы работы газопоршневых установок. / Д. С. Агапов, А.П. Картошкин // Журнал Сельский механизатор. – 2015. – №5. – С. 32–33.
6. Агапов Д.С. Эксергетическая функция теплоты и термический КПД энергоустановок при переменной температуре. / Д. С. Агапов // Известия СПбГАУ – 2011. – №24. – С. 322–325.

7. Агапов Д.С. Оптимизация температурного режима тракторных дизелей. / Д. С. Агапов, А.В. Николаенко // Научно-технический сборник: «Двигателестроение». – СПб.: Изд-во СПбГПУ. – 2004. – С. 63–70.
8. Агапов Д.С. Совершенствование тепловых двигателей энтропийным методом на основе положений неравновесной термодинамики. / Д. С. Агапов // Известия СПбГАУ – 2016. – № 44. – С. 386-393.
9. Агапов Д.С. Определение оптимального минимума разности температур между композитными кривыми при проведении пинч-анализа энергетических систем сельскохозяйственного назначения. / Д. С. Агапов // Известия СПбГАУ. – 2012. – №28. – С. 386–391.
10. Агапов Д.С. Правило эвристической отметки при проектировании теплообменной сети. / Д. С. Агапов // Известия СПбГАУ. – 2012. – №29. – С. 264–269.
11. Агапов Д.С. Снижение энергетических затрат системы путем глубокой интеграции тепловых процессов. / Д. С. Агапов // Известия СПбГАУ. – 2012. – №30. – С. 263–266.
12. Агапов Д.С. Устройство преобразования нестационарного теплового потока для его интеграции в производственные технологические линии. / Д. С. Агапов // Известия СПбГАУ. – 2014. – №37. – С. 241–249.
13. Агапов Д.С. Термодинамическое совершенствование утилизационного модуля когенерационной установки. / Д. С. Агапов // Известия Международной академии аграрного образования «Материалы международной научно-практической конференции «Технические системы, сервис и энергетика».– СПб.: Изд-во СПбГАУ. – 2013. – №15, Том 3. – С. 148–153.
14. Агапов Д.С. Улучшение теплообменной сети утилизационного модуля когенерационных установок JENBACHER. / Д. С. Агапов // Известия Международной академии аграрного образования «Материалы международной научно-практической конференции «Технические системы, сервис и энергетика».– СПб.: Изд-во СПбГАУ. – 2013. №16, Том 4. – С. 281–287.
15. Агапов Д.С. Методика термодинамического совершенствования когенерационной установки. / Д. С. Агапов // Известия СПбГАУ. – 2013. – №33. – С. 220–229.
16. Агапов Д.С. Определение термоэкономических показателей энергопреобразующих систем. / Д. С. Агапов // Известия СПбГАУ. – 2014. – №34. – С. 127–132.
17. Агапов Д.С. Повышение эффективности энергоустановок в условиях квазистационарного теплового режима. / Д. С. Агапов, И.В. Белинская. // Известия СПбГАУ. – 2014. – №34. – С. 191–196.
18. Агапов Д.С. Применение пинч-анализа к структурной оптимизации ДВС. / Д. С. Агапов // Известия СПбГАУ. – 2014. – №38. – С. 242–246.
19. Агапов Д.С. Структурная оптимизация технологии получения сахара. / Д. С. Агапов // Известия СПбГАУ – 2015. –·№39. – С. 330–338.
20. Агапов Д.С. Выбор энергетического оборудования и определение оптимальных режимов эксплуатации. / Д. С. Агапов // Известия СПбГАУ. – 2014. – № 40. – С. 227-234.

Патенты

21. Патент РФ на полезную модель №157238. Российская Федерация, F28F 27/00 (2006.01). «Теплообменный аппарат». Бюлл. № 33. Опубл. 27.11.2015.
22. Патент РФ на полезную модель №155349. Российская Федерация, F02B 29/04 (2006.01). «Теплоэнергетическая установка с разделенными процессами сжатия и расширения». Соавторы: Куколев М.И., Кукис В.С., Романов А.В. Бюлл. № 28. Опубл. 10.10.2015.
23. Патент РФ на полезную модель №156745. Российская Федерация, F02G 5/02 (2006.01) F02G 1/00 (2006.01) F02B 39/02 (2006.01). «Силовая установка с разделенными процессами сжатия и расширения». Соавторы: Куколев М.И., Кукис В.С., Романов А.В. Бюлл. № 32. Опубл. 20.11.2015.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

24. Свидетельство № 2015612919. " Пинч-анализ и теплообменная сеть": программа для ЭВМ / Д. С. Агапов (RU); правообладатель Д. С. Агапов ; заявл. 29.12.14; опубл. 26.02.2015, 13,9 Мб.

Статьи в трудах, материалах международных и всероссийских конференций, в сборниках научных трудов

25. Агапов Д.С. Принципы оптимизации температурного режима двигателей. / Д. С. Агапов, А.В. Николаенко, П.А. Андреев // Сборник научных трудов научно-технической конференции по теме: «Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей». – СПб. – 2003. – С. 521–528.
26. Агапов Д.С. Принципы и подходы к анализу термодинамических систем. / Д. С. Агапов // Сборник научных трудов научно-технической конференции по теме: «Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей».– СПб.: Изд-во СПбГАУ., – 2011. – С. 248–252.
27. Агапов Д.С. Термоэкономическая оценка технических объектов. / Д. С. Агапов // Сборник научных трудов XXX отраслевой научно-технической конференции молодых специалистов "Морское подводное оружие. Морские подводные роботы – вопросы проектирования, конструирования и технологий. МПО-МС-2014. – С. 195–200.
28. Агапов Д.С. Снижение энергопотребления установок нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности на основе пинч-анализа. / Д. С. Агапов // Сборник трудов VI международной научно-практической конференции «Новые горючие и смазочные материалы с присадками».– СПб.: Изд-во СПбГАУ., – 2010. – С. 137–142.
29. Агапов Д.С., Николаенко А.В., Андреев П.А. Разработка математической модели зависимости мощности двигателя от его температурного режима. / Д. С. Агапов, А.В. Николаенко, П.А. Андреев // Сборник научных трудов научно-технической конференции по теме: «Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей». – СПб., – 2002. – С. 303–311.
30. Агапов Д.С. Суммарный КПД тепловой энергетической установки. / Д. С. Агапов // Сборник научных трудов научно-технической конференции по

теме: «Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей». – СПб.: Изд-во СПбГАУ. – 2011. – С. 252–255.
31. Агапов Д.С. КПД комбинированной тепловой энергетической установки. / Д. С. Агапов // Сборник научных трудов научно-технической конференции по теме: «Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей». – СПб.: Изд-во СПбГАУ. – 2010. – С. 223–225.
32. Агапов Д.С. Определение КПД составной тепловой энергетической установки. / Д. С. Агапов // Сборник научных трудов международной научно-технической конференции института технических систем, сервиса и энергетики по теме: «Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей». – СПб.: Изд-во СПбПУ. – 2014. – С. 181–183.
33. Агапов Д.С. Разработка способа подвода теплоты для получения максимальной работы при температурно-динамических ограничениях. / Д. С. Агапов // Сборник научных трудов научно-технической конференции по теме: «Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей». – СПб.: Изд-во СПбГАУ. – 2009. – С. 250–251.
34. Агапов Д.С. Результаты экспериментальных исследований системы предпусковой подготовки бензиновых двигателей с тепловым аккумулятором фазового перехода. / Д. С. Агапов, И.А. Косенков, А.П. Картошкин // Сборник научных трудов научно-технической конференции по теме: «Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей». – СПб.: Изд-во СПбГАУ. – 2010. – С. 302–310.
35. Агапов Д.С. Эксергетический анализ систем ДВС. / Д. С. Агапов // Сборник научных трудов международной научно-технической конференции института технических систем, сервиса и энергетики по теме: «Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей».– СПб.: Изд-во СПбПУ. – 2014. – С. 183–187.
36. Агапов Д.С. Снижение работоспособности теплоты при теплообмене с промежуточными теплоносителями. / Д. С. Агапов // Сборник научных трудов научно-технической конференции по теме: «Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей».– СПб.: Изд-во СПбГАУ. – 2011. С. 345–349.
37. Агапов Д.С. Снижение работоспособности системы с промежуточными теплоносителями за счет увеличения производства энтропии в энергетических установках с тепловыми двигателями. / Д. С. Агапов // Научный журнал «Аграрный вестник Верхневолжья». Ивановская ГСХА им. академика Беляева. – 3013. – №2(3). С. 45–47.
38. Агапов Д.С. К вопросу оптимизации температурного режима двигателя Д-240. / Д. С. Агапов, П.А. Андреев // Сборник научных трудов научно-технической конференции: «Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей». – СПб. – 2001. – С. 425–426.
39. Агапов Д.С. К вопросу оптимизации температурного режима двигателя Д-240Т. / Д. С. Агапов, П.А. Андреев // Сборник научных трудов научно-технической конференции по теме: «Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей». – СПб. – 2001. – С. 478-480.

40. Агапов Д.С. К вопросу исследования высокотемпературного охлаждения с непосредственной регенерацией масла. / Д. С. Агапов, А.В. Николаенко, П.А. Андреев // Сборник научных трудов научно-технической конференции по теме: «Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей». – СПб. – 2002. – С. 311–320.
41. Агапов Д.С. Оптимизация температурного режима автотракторных двигателей. / Д. С. Агапов, А.В. Николаенко, П.А. Андреев // Труды международной научно-практической конференции по теме: «Актуальные проблемы теории и практики современного двигателестроения», – Челябинск. – 2003. – С. 128–133.
42. Агапов Д.С. Улучшение топливно-экономических и энергетических показателей дизеля оптимизацией температурного режима. / Д. С. Агапов // Сборник научных трудов научно-технической конференции по теме: «Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей». – СПб. – 2004. – С. 340–348.
43. Агапов Д.С. Прогнозирование и оценка влияния температуры охлаждающей жидкости на основные показатели двигателя с принудительным зажиганием. / Д. С. Агапов, С.В. Сапожников // Сборник научных трудов научно-технической конференции по теме: «Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей». – СПб. – 2004. – С. 447–456.
44. Агапов Д.С. Методика определения количества теплоты отводимой в окружающую среду от энергосиловой установки автомобиля и трактора. / Д. С. Агапов // Сборник научных трудов научно-технической конференции по теме: «Улучшение эксплуатационных показателей двигателей, тракторов и автомобилей». СПб. – 2008. – С. 187–189.
45. Агапов Д.С. Результаты экспериментальных исследований маслянистости гидравлических и трансмиссионных масел (ГиТМ) при их регенерации. / Д. С. Агапов, А.П. Картошкин, В.А. Филимонов // Международная научно-техническая конференция. «Теория и практика повышения качества и рационального использования масел, смазочных материалов и технических жидкостей» – СПб.: Изд-во СПбГАУ. – 2007. – С. 209–216.
46. Агапов Д.С. Применение и взаимозаменяемость масел при высокотемпературном охлаждении автотракторных двигателей. / Д. С. Агапов // Международная научно-техническая конференция. «Теория и практика повышения качества и рационального использования масел, смазочных материалов и технических жидкостей» СПб.: Изд-во СПбГАУ. – 2007. – С. 222–228.
47. Агапов Д.С. Оптимальное значение пинча при интеграции тепловых процессов. / Д. С. Агапов // Сборник научных трудов XXX отраслевой научно-технической конференции молодых специалистов "Морское подводное оружие. Морские подводные роботы – вопросы проектирования, конструирования и технологий. МПО-МС-2013. – С. 186–191.
48. Агапов Д.С. Обоснование рационального значения минимума разности температур между композитными кривыми при проведении пинч-анализа энергетических систем нефтеперерабатывающих производств. / Д. С. Агапов // Сборник трудов форума «Инновационные технологии в об-

ласти получения и применения горючих и смазочных материалов».– СПб.: Изд-во СПбГПУ. – 2013. – С. 56–61.
49. Агапов Д.С. Снижение энергопотребления установок приготовления кормов на основе пинч-анализа. / Д. С. Агапов // Сборник научных трудов по теме «Совершенствование технологических процессов и рабочих органов машин в животноводстве». – СПб.: Изд-во СПбГАУ. – 2010. – С. 61–66.
50. Агапов Д.С. Пинч-анализ при проектировании перспективных технологий переработки продукции сельского хозяйства. / Д. С. Агапов, А.П. Картошкин // Журнал «Материалы международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве».– Минск.: Изд-во БГАТУ. – 2013. – С. 183–186.
51. Агапов Д. С. Применение пинч-анализа к структурной оптимизации автотранспортных средств / Д. С. Агапов // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. – 2015. – Вып. 2. – С. 18–22. – ISSN 2409-7829.
52. Агапов Д.С. Проблемы и перспективы рационального использования теплоты на автотранспорте / Д. С. Агапов // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической "Альтернативные источники энергии: проблемы и перспективы рационального использования". Воронеж, 20-21 марта 2014. Т 1. – С. 26–30.
53. Агапов Д.С. К вопросу о применении спиртовых топлив в дизелях. / Д. С. Агапов, А.П. Картошкин, В.В. Беляков // Сборник научных трудов научно-технической конференции по теме: «Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей» .– СПб.: Изд-во СПбГАУ. – 2007. – С. 78–81.
54. Агапов Д. С. О применении оксигенатных топлив в ДВС. / Д. С. Агапов // Материалы международной научно-технической конференции «Транспортные и транспортно-технологические системы»:. – Тюмень : ТюмГНГУ. – 2015. – С. 15–18.
55. Агапов Д.С. Комплексное термодинамическое совершенствование энергетических установок на основе пинч-анализа и эксергетического анализа. / Д. С. Агапов // Сборник научных трудов XXX отраслевой научно-технической конференции молодых специалистов "Морское подводное оружие. Морские подводные роботы - вопросы проектирования, конструирования и технологий. МПО-МС–2012. – С. 242–251.
56. Агапов Д.С. Термодинамическое совершенствование энергетических установок интеграцией тепловых процессов на основе эксергетического анализа. / Д. С. Агапов // Материалы второй всероссийской межотраслевой научно-технической конференции «Актуальные проблемы морской энергетики».– СПб.: Изд-во СПбГМТУ. 2013. – С. 254–255.
57. Агапов Д. С. Термодинамическое совершествование утилизационного модуля когенерационной установки JENBACHER / Д. С. Агапов // Сб. науч. тр. междунар. науч.- техн. конф. «Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей». СПб.: Изд-во СПбГАУ. – 2015. – С. 124–131.

58. Агапов Д.С. Конструктивные мероприятия по совершествованию утилизационных модулей энергетических установок. / Д. С. Агапов // Сборник научных трудов международной научно-технической конференции института технических систем, сервиса и энергетики по теме: «Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей». – СПб.: Изд-во СПбПУ. – 2014. – С. 111–123.
59. Агапов Д.С. Термоэкономическая оценка энергопребразующих систем. / Д. С. Агапов // Materiały IX Międzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji «PERSPEKTYWICZNE OPRACOWANIA SĄ NAUKĄ I TECHNIKAMI– 2013», – 2013. – №38. – С. 16–18.
60. Агапов Д.С. Эксергетический анализ систем энергетических установок. / Д. С. Агапов // Сборник научных трудов научно-технической конференции по теме: «Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей». – СПб.: Изд-во СПбГАУ. – 2010. – С. 226–230.
61. Агапов Д.С. Методика термоэкономической оценки технических объектов на примере когенерационной установки. / Д. С. Агапов // Журнал «Материалы международной научно-практической конференции «Перспективные технологии и технические средства в сельскохозяйственном производстве».– Минск.: Изд-во БГАТУ. – 2013. Часть 1. – С. 54–57.
62. Агапов Д.С. Прогнозирование ресурса технических изделий. / Д. С. Агапов // Сборник научных трудов научно-технической конференции по теме: «Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей».– СПб.: Изд-во СПбГАУ. – 2008. – С. 239–243.
63. Агапов Д.С. Остаточный ресурс технических изделий. / Д. С. Агапов // Сборник научных трудов научно-технической конференции по теме: «Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей». – СПб.: Изд-во СПбГАУ. – 2010. С. 218–223.
64. Агапов Д.С. Методика интеграции тепловых двигателей в технологические процессы предприятий производства и переработки сельскохозяйственной продукции. Проблемы механизации и электрификации сельского хозяйства: материалов Всерос. науч.-практ. интернет-конф., 6 дек. 2013 г. – Краснодар: Кубанский ГАУ. – 2014. – С. 260 – 264.
65. Агапов Д.С. Исследование внутрицилиндровых процессов подвода теплоты к рабочему телу в цикле ДВС на основе неравновесной термодинамики. / Д. С. Агапов // Известия СПбГАУ. – 2016. – №42. – С. 346 – 354.