

На правах рукописи



ЛЬВОВА АЛИНА МИХАЙЛОВНА

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК НА ФТОРУГЛЕРОДНЫХ РАБОЧИХ ВЕЩЕСТВАХ,
УТИЛИЗИРУЮЩИХ ТЕПЛОТУ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

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

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре Теоретических основ теплотехники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»)

Научный руководитель: **Сухих Андрей Анатольевич**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Теоретических основ теплотехники ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Официальные оппоненты: **Александров Игорь Станиславович**
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Теплогазоснабжение и вентиляция ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет».

Шамсутдинов Эмиль Васильевич
кандидат технических наук, доцент, директор Департамента развития внешних связей ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Защита состоится « 24 » июня 2021 года в 15 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета МЭИ.021 при ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» по адресу: 111250 г. Москва, Красноказарменная ул., д.17, ауд. Г-406.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Отзывы на автореферат диссертации в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, Ученый совет ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан « ___ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
МЭИ.021, д.т.н.



Терешин А.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Тематика настоящей диссертационной работы посвящена вопросам разработки электрогенерирующих установок на базе органического цикла Ренкина (ОЦР), утилизирующих теплоту низкого температурного потенциала. Количество таких источников антропогенного происхождения огромно. В первую очередь, с точки зрения перспективы использования для выработки электрической энергии следует обратить внимание на такие источники сбросной теплоты (вторичные энергетические ресурсы) промышленных предприятий металлургической, химической отраслей, цементного производства, процессов сушки, систем охлаждения высокотемпературных производств, производств пищевой отрасли, центров обработки данных (ЦОД). Теплота такого температурного уровня (80 – 150 °С), как правило, сбрасывается в окружающую среду, что всегда создает экологические проблемы. В диссертации разработана и проанализирована тепловая схема утилизации низкопотенциального ВЭР химического производства.

Важной задачей являлось также решение вопросов аварийного и автономного электроснабжения в зимние периоды согласно данным по продолжительности прекращения электроснабжения потребителей вследствие технологических нарушений. В настоящей работе разработана и проанализирована тепловая схема электрогенерирующей установки в составе центрального теплового пункта. Основная цель такой разработки – решение задачи обеспечения собственных нужд электрической энергией и независимости электроснабжения от внешних электрических сетей, что чрезвычайно важно в случае аварийных ситуаций на линиях электропередачи в зимние периоды.

Разработка и внедрение технологий, направленных на решение экологических проблем, а также вопросов повышения энергетической эффективности производств, являются актуальными. Кроме этого, немаловажно обозначить предложения по повышению уровня промышленной безопасности, и таковым, в первую очередь, является внедрение установок аварийного электроснабжения и использование в качестве рабочих веществ фторуглеродов, обладающих высокой термической стойкостью, пожаро- и взрывобезопасностью, химической инертностью и неопасностью для человека.

Тематика настоящей работы, поставленные цели исследования направлены на решение перечисленных выше проблем и поэтому являются актуальными.

Степень разработанности темы исследования. Современные тенденции таковы, что в технически передовых странах данное направление бурно развивается. Обзор доступных литературных источников дает информацию о конкретных схемных решениях и объектах применения технологий ОЦР. Широко представлены характеристики установок, утилизирующих теплоту выхлопных и дымовых газов. Как правило, используются двухконтурные схемы: в турбинном контуре циркулирует органическое рабочее вещество, а в утилизирующем – термостойкое масло. Значительная часть исследований и разработок по применению низкокипящих рабочих веществ (до 40 % всех работ) посвящена решению

задач по утилизации тепловой энергии от нетрадиционных и возобновляемых источников в геотермальной и солнечной энергетике. Особенностью «солнечных» проектов является маломасштабность модулей по выработке электрической энергии: в большинстве установок величина отпускаемой электрической мощности не превышает единиц – десятков кВт, а уровень температуры источника тепловой энергии не превышает 120 – 140 °С.

Разработки одноконтурных схем, циклов и процессов на термически стойких (до температур порядка 550 °С) фторуглеродных рабочих веществах (предлагаемых к использованию в настоящей работе) в зарубежных источниках отсутствуют, а в российских представлены единичными работами.

Цель диссертационной работы заключается в разработке и расчетно-экспериментальном исследовании технических решений, направленных на повышение энергетической, экологической и экономической эффективности электрогенерирующей установки, работающей по циклу Ренкина на фторуглеродных рабочих веществах (октафторпропан, октафторциклобутан) с контуром регенерации, при утилизации ВЭР низкого температурного потенциала.

Основные задачи исследования:

1) На основе обзора и анализа публикаций в российских и зарубежных литературных источниках по тематике диссертации выявить преимущества и недостатки известных технических решений и сформулировать предложения, необходимые для разработки системы электрогенерирующего модуля (ЭЛГМ) на утилизации низкопотенциальных ВЭР.

2) Разработать схемы применения электрогенерирующего модуля на фторуглеродном веществе для утилизации низкопотенциальной теплоты ВЭР на примере химического промышленного предприятия и в системе теплового пункта в зоне эксплуатации предприятия на источнике низкого температурного потенциала, а также разработать рекомендации по выбору типа расширителя электрогенерирующего модуля при утилизации низкопотенциальных ВЭР малой мощности.

3) На основе методов термодинамического анализа, в том числе эксергетического анализа предлагаемого цикла на ряде рабочих веществ обосновать выбор оптимального низкокипящего рабочего вещества для турбинного контура, определить оптимальные параметры рабочих режимов электрогенерирующего модуля с точки зрения достижения максимальной выработки электрической мощности, а также получить подтверждение термодинамической эффективности всей установки и ее основных аппаратов.

4) Выбрать и обосновать методику разнесения затрат условного топлива при совместной выработке тепловой и электрической энергии, а также выполнить технико-экономическую оценку эффекта применения электрогенерирующего модуля при утилизации низкопотенциальных ВЭР малой мощности.

5) Выполнить расчетно-экспериментальное исследование теплообменных характеристик конденсатора электрогенерирующего модуля и разработать математическую модель расчета локальных значений коэффициента теплоотдачи при конденсации фторуглеродного рабочего вещества.

Научная новизна работы

1) Предложена методика выбора оптимального с точки зрения экологической, энергетической и экономической эффективности рабочего вещества исследуемого электрогенерирующего модуля на органическом цикле Ренкина при утилизации ВЭР низкого температурного потенциала.

2) Анализ термодинамических параметров разработанных схем применения электрогенерирующего модуля на выбранных рабочих веществах (октафторпропан, октафторциклобутан) позволил определить оптимальные проектируемые параметры при комбинированной выработке электрической и тепловой энергии.

3) Разработана математическая модель расчета локальных коэффициентов теплоотдачи при конденсации насыщенного пара октафторпропана в микроканалах пластинчатого теплообменника на участке ламинарного режима течения пленки конденсата.

Теоретическая значимость работы

1) Проведен анализ методов разнесения затрат на выработку электрической энергии и теплоты, в результате которого выбран метод, основанный на анализе эксергетических потоков.

2) Проведен технико-экономический анализ эффективности электрогенерирующего модуля и показаны его достоинства в сопоставлении с широко используемыми в качестве автономных установок двигателями внутреннего сгорания.

3) Получены и использованы для определения основных теплообменных характеристик результаты теплотехнических испытаний прототипа пластинчатого конденсатора на опытном стенде.

4) На основе разработанной математической модели получены аналитические соотношения для расчета локальных коэффициентов теплоотдачи фторуглеродного рабочего вещества в пластинчатом теплообменнике на участке ламинарного режима течения пленки конденсата. Результаты расчета по полученным соотношениям сопоставлены с результатами расчета теплообменных характеристик по известным соотношениям и по экспериментальным данным.

Практическая значимость работы

1) Разработана и защищена патентом на изобретение оригинальная схема электрогенерирующего модуля в системе теплового пункта промышленного предприятия с избыточными ВЭР низкого температурного потенциала, позволяющая обеспечить высокоэффективную совместную выработку электрической и тепловой энергии в целях обеспечения резервного источника электроснабжения в случае аварийных ситуаций на централизованной ЛЭП.

2) Результаты исследования электрогенерирующего модуля на ОЦР на октафторпропане в системе теплового пункта промышленного предприятия могут быть применены для расчета энергетических характеристик исследуемой установки на утилизации низкопотенциальных ВЭР промышленных предприятий.

3) Результаты теплотехнических испытаний циркуляционного стенда на октафторпропане формируют экспериментальную базу для оценки энергетичес-

кой эффективности как данной установки при использовании новых рабочих веществ, так и для разработки подобных систем широкого диапазона мощности.

4) Результаты исследования могут быть использованы научными и проектными организациями для обоснования технических решений при разработке когенерационных установок для совместного производства электрической и тепловой энергии.

Защищаемые научные положения

1) Схемные решения комплексов на базе органического цикла Ренкина (ОЦР) в технологической схеме химического производства при утилизации низкопотенциального вторичного энергетического ресурса и в системе центрального теплового пункта (ЦТП) химического промышленного предприятия.

2) Результаты сравнительного анализа термодинамической эффективности электрогенерирующего модуля при работе на различных рабочих веществах при утилизации низкопотенциальных источников теплоты.

3) Результаты, подтверждающие высокую энергетическую эффективность утилизации низкопотенциальных источников теплоты в установках на базе регенеративного цикла на октафторпропане.

4) Результаты анализа разнесения затрат условного топлива методом эксергетических потоков при совместной выработке электрической и тепловой энергии.

5) Результаты верификации теплообменных характеристик конденсатора, рассчитанных по известным методикам, со значениями, полученными при проведении теплотехнических испытаний.

6) Результаты аналитических соотношений локальных коэффициентов теплоотдачи при конденсации фторуглеродного рабочего вещества в микроканалах пластинчатого теплообменника на участке ламинарного режима течения пленки конденсата.

Методология и методы исследования

В работе использованы методы технической термодинамики, математического моделирования и анализа, методы экспериментального исследования теплотехнических характеристик прототипов теплообменного оборудования.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечиваются применением научно обоснованных и практически апробированных методов термодинамического и экономического анализа когенерационных систем, анализом патентной информации по существующим техническим решениям и патентной проверкой и защитой вновь разработанных, оригинальность которых подтверждена патентом на изобретение. А также постановкой, проведением и использованием результатов теплотехнических испытаний.

Апробация полученных результатов

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики», Москва, 9—11 октября 2017 г.; заседании кафедры Теоретических основ теплотехники ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» (протокол № 3/17 от 14.11.2017 г.) 14 ноября 2017 г.; XXIV Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 15 – 16

марта 2018 г.); научных семинарах кафедры Теоретических основ теплотехники ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» 17 апреля 2019 г. и 29 мая 2019 г.; заседаниях кафедры Теоретических основ теплотехники ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» (протокол № 7/18 от 11.06.2019 г.) 11 июня 2019 г.; научных семинарах кафедры Промышленных теплоэнергетических систем ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» 26 июня 2019 г. и 4 марта 2020 г.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Содержит 189 страниц, 55 иллюстраций, 67 таблиц. Список используемых источников включает 116 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности темы исследования, сформулированы цели и задачи, оценена степень разработанности темы исследования, отмечена научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость, сформулированы применяемые методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту; обоснована степень достоверности полученных результатов; приведены сведения об апробации результатов исследования и личном вкладе автора диссертации.

В первой главе выполнен обзор зарубежных и отечественных исследований установок на базе органического цикла Ренкина (ОЦР), на его основе сделаны следующие выводы.

Ключевым вопросом при проектировании теплосилового контура электрогенерирующего модуля при утилизации ВЭР низкого температурного потенциала являлся выбор рабочего низкокипящего вещества. Рассмотрены и учтены главные требования к выбору рабочего вещества. Конфигурация термодинамического цикла (базовый, регенеративный, с наличием дополнительного теплообменного контура, с наличием теплового аккумулятора) имеет весомую роль в вопросах повышения энергоэффективности таких систем.

Сформулированы основные предложения для внедрения электрогенерирующего модуля на ОЦР в технологическую схему промышленного предприятия для утилизации ВЭР низкого температурного потенциала в качестве автономного источника энергообеспечения в базовом режиме. Особо подчеркивается предназначение электрогенерирующего модуля для предотвращения аварийных ситуаций.

Вторая глава содержит примеры разработанных схем внедрения и расчет основных энергетических характеристик утилизационной установки электрогенерирующего модуля: в технологическую схему производства химического продукта при утилизации теплоты сокового пара, в систему кондиционирования воздуха ЦОД, а также частный случай включения электрогенерирующего модуля на ОЦР в схему теплового пункта промышленного предприятия.

Технологическая схема производства аммофоса приведена на рисунке 1. Принципиальная схема реконструкции системы холодоснабжения ЦОД с внед-

рением электрогенерирующего модуля на ОЦР приведена на рисунке 2. На рисунке 3 представлена тепловая схема интеграции электрогенерирующего модуля на ОЦР в систему ЦТП промышленного предприятия.

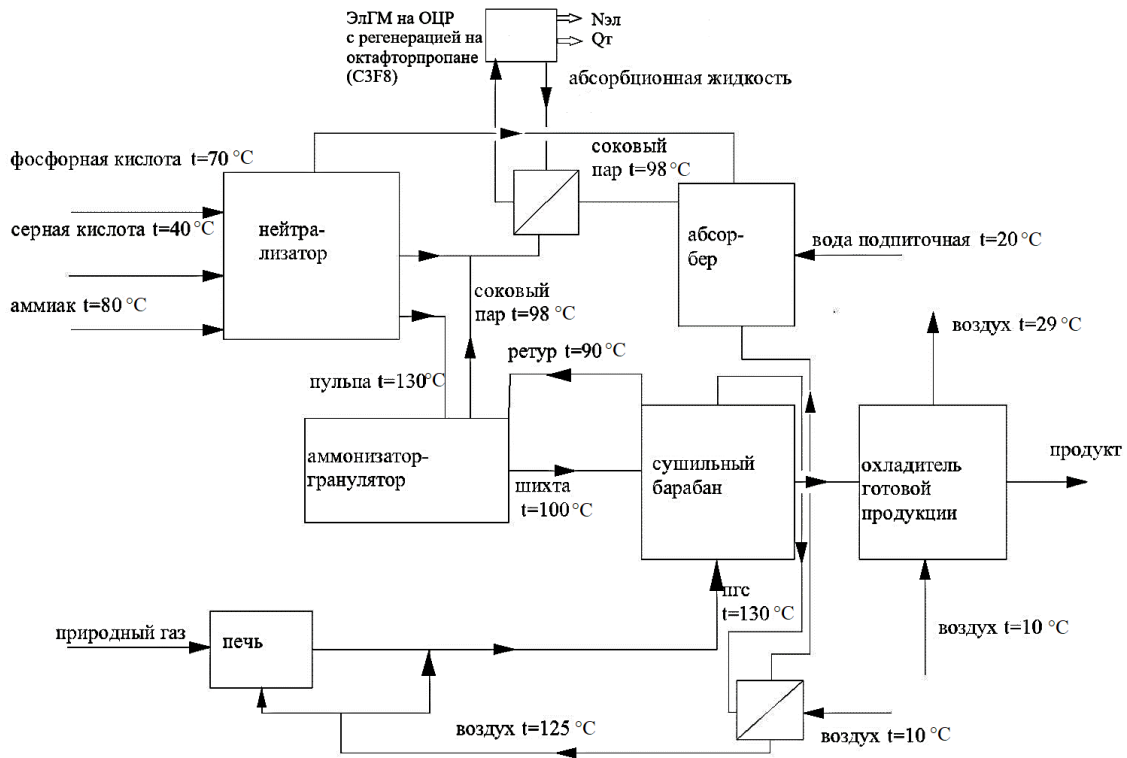
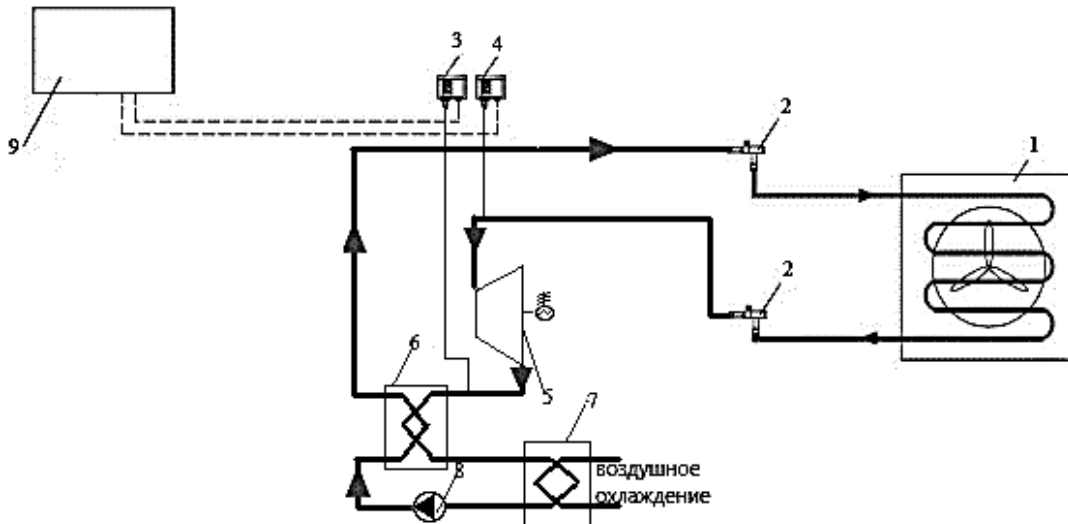


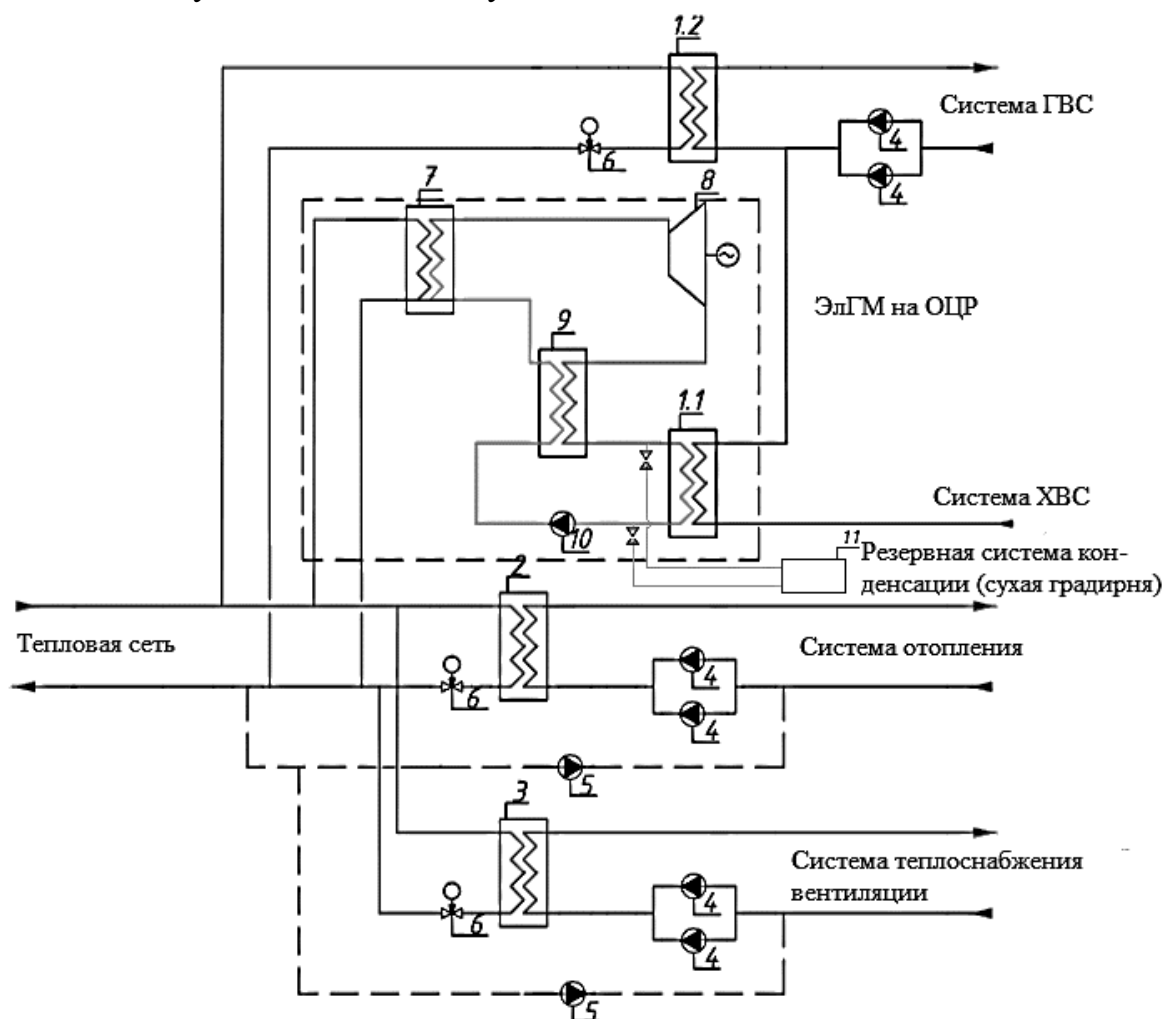
Рисунок 1 – Схема производства аммофоса с утилизацией ВЭР электрогенерирующим модулем



1 – теплообменник воздушного охлаждения; 2 – запорный клапан; 3 – реле низкого давления; 4 – реле высокого давления; 5 – микротурбина электрогенерирующего модуля (расширитель); 6 – регенеративный теплообменник; 7 – конденсатор электрогенерирующего модуля (воздушное охлаждение); 8 – насос электрогенерирующего модуля; 9 – электрический щит.

Рисунок 2 – Принципиальная схема реконструируемой системы холодо-снабжения ЦОД с внедрением электрогенерирующего модуля на фторуглеродном рабочем веществе

Разработанная технологическая схема позволяет использовать температурный потенциал прямой сетевой воды, приходящей на ЦТП от котельной для выработки электрической энергии с помощью модуля на низкокипящем рабочем веществе, а отводимую теплоту в конденсаторе использовать для подогрева холодной воды, поступающей в систему ГВС.



1.1 – теплообменник первой ступени подогрева системы ГВС (конденсатор на ОЦР); 1.2 – теплообменник второй ступени подогрева системы ГВС; 2 – теплообменник подогрева системы отопления; 3 – теплообменник подогрева системы теплоснабжения вентиляции; 4 – циркуляционный насос; 5 – насос линии подпитки; 6 – регулирующий клапан; 7 – теплообменник-парогенератор электрогенерирующего модуля; 8 – микротурбина; 9 – теплообменник-регенератор; 10 – насос; 11 – резервная система конденсации

Рисунок 3 – Тепловая схема внедрения электрогенерирующего модуля с регенерацией в систему ЦТП с закрытой системой ГВС

Перечень возможных рабочих веществ, пригодных для использования в установках на основе ОЦР, в данном температурном диапазоне весьма широк. Основные рабочие вещества: фторуглеродного состава – октафторпропан (R218 (C_3F_8)) и октафторциклобутан (R318 (C_4F_8)) – выбраны с точки зрения максимальной термодинамической эффективности, пожаро- и взрывобезопасности, показателей разрушения озонового слоя и влияния на глобальное потепление и

своих особых свойств в плане химической инертности и, следовательно, безопасности для человека. Данные вещества имеют положительный наклон кривой конденсации, что обеспечит протекание процесса расширения в турбине в области перегретого пара и, следовательно, отсутствие механического и коррозионного износа лопаток вследствие воздействия потока капель жидкости.

На примере парогенератора и рабочих веществ R507a, R125, R134a, R227e на рисунке 4 представлен результат анализа температурного уровня нагреваемой среды и зависимости проектируемых температурных напоров между греющей (теплосетевая вода) и нагреваемой средой (рабочее вещество) от изменения энтальпий теплоносителей по длине каждого теплообменного аппарата.

Оценка термодинамической эффективности исследуемых рабочих веществ представлена на рисунке 5, где показана зависимость термического КПД цикла с регенерацией от давления на входе в турбину.

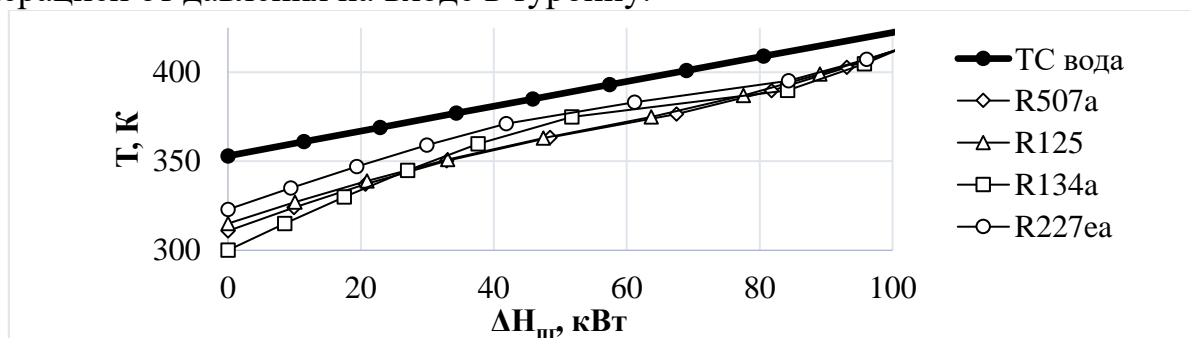


Рисунок 4 – Изменение температур греющей (теплосетевая вода) и нагреваемой среды (рабочие вещества) T от изменения энтальпий ΔH теплоносителей по длине теплообменного аппарата (на примере парогенератора)

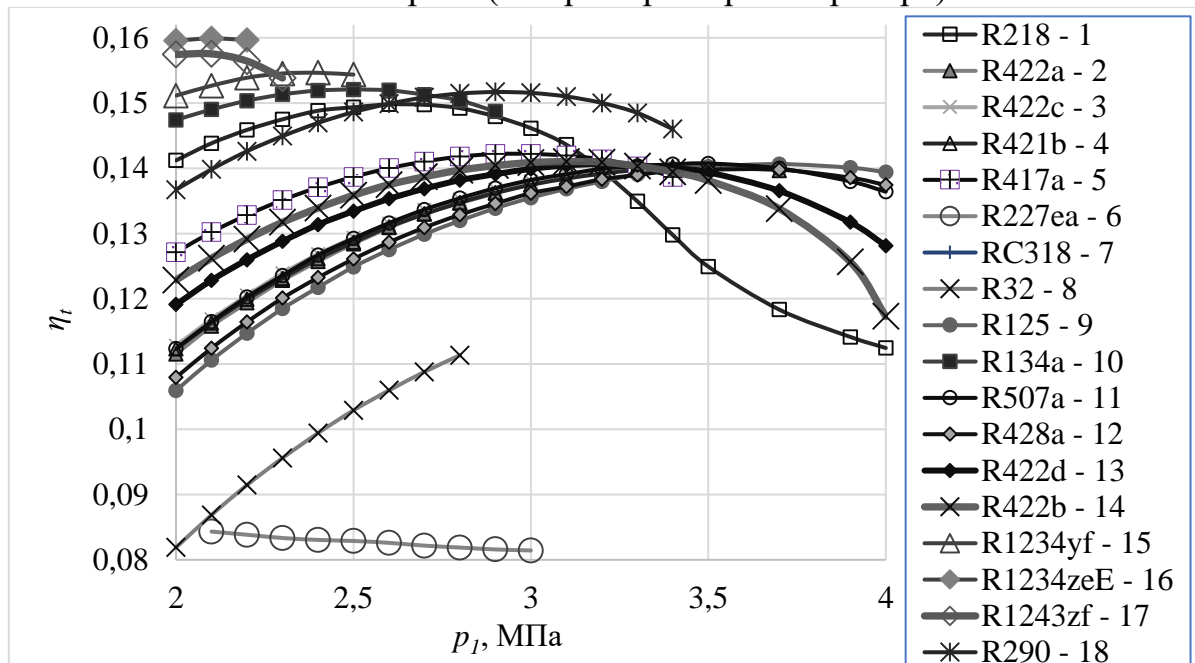


Рисунок 5 – Зависимость термического КПД регенеративного цикла Ренкина η_t на различных рабочих веществах от давления на входе в турбину p_1

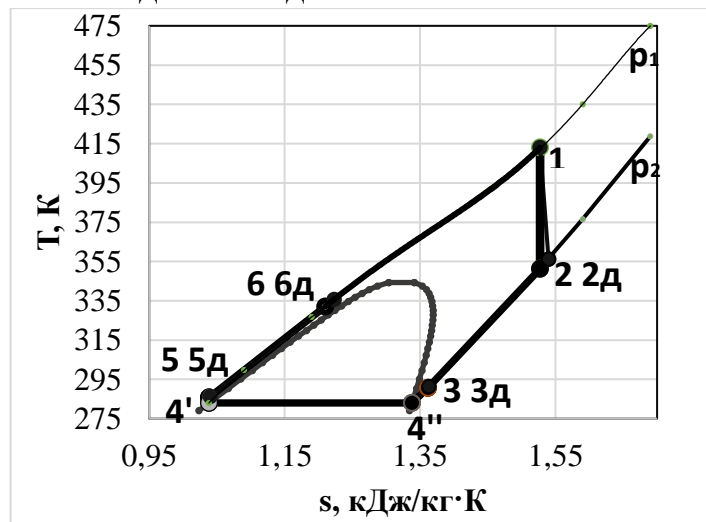
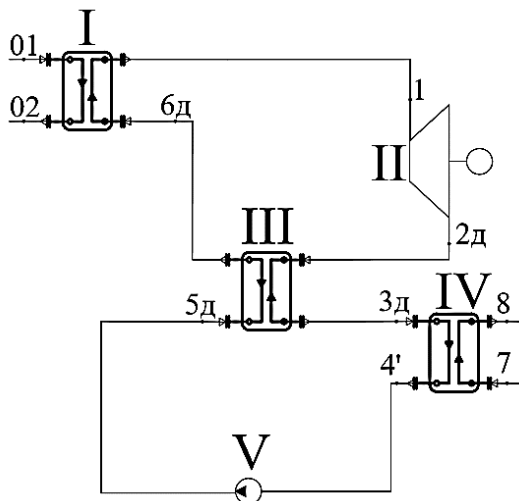
Проектируемые технические характеристики электрогенерирующего модуля на октафторпропане находятся в следующих диапазонах:

- параметры сетевой воды, расход сетевой воды в парогенераторе: в расчетный режим отопительного периода - $\tau_{01}^p/\tau_{02}^p = 130/70$ °С; $G_{тс}^p = 2,11$ кг/с.
- температурный диапазон, расход и мощность конденсатора (подогревателя ГВС): $T_K = 40$ °С; $G_{хвс} = 3,95$ кг/с; $G_{ЭлГМ}^p = 7,56 \frac{кг}{с}$; $Q_K = 550$ кВт.
- электрическая энергия: $N_{эл} = 32 \dots 56$ кВт.

Третья глава посвящена решению задачи оптимизации параметров цикла, тепловая схема и конфигурация которого в T-S координатах приведена на рисунке 6, при условии максимума вырабатываемой электрической энергии. В результате анализа установлено, что максимальная производительность по выработке электроэнергии достигается при температуре конденсации $T_K = 40$ °С.

Проведен расчетный анализ характеристик энергетической эффективности действительного цикла электрогенерирующего модуля: зависимости удельных показателей подведенной $q_{подв}$ и отведенной тепловой мощности $q_{отв}$; работы, совершаемой турбиной l_t , насосом l_n , удельной работы цикла $l_{ц}^д$ и зависимости внутреннего КПД ОЦР η_i от температуры конденсации октафторпропана, приведенные на рисунке 7, зависимости абсолютного значения вырабатываемой электрической мощности $N_{ЭлГМ}$ от температуры конденсации октафторпропана, приведенной на рисунке 8.

Проведены расчеты основных характеристик энергетической эффективности действительного цикла ЭлГМ в зимний период на переменных режимах работы тепловой сети при различной температуре наружного воздуха t_n от -28 до 0 °С и ее продолжительности N , ч, изменение которой приведено на рисунке 9, а также установлена зависимость вырабатываемой электрической мощности при конкретных значениях температуры источника теплоты τ_{01i} , приведенная на рисунке 10. Установлен диапазон изменения и продолжительности вырабатываемой электрической мощности в течение года: от 56 до 32 кВт.



I – теплообменник-парогенератор, II – микротурбина, III – теплообменник-рекуператор, IV – конденсатор, V – циркуляционный насос контура электрогенерирующего модуля.

Рисунок 6 – Тепловая схема и конфигурация действительного цикла электрогенерирующего модуля с регенерацией в T-S координатах

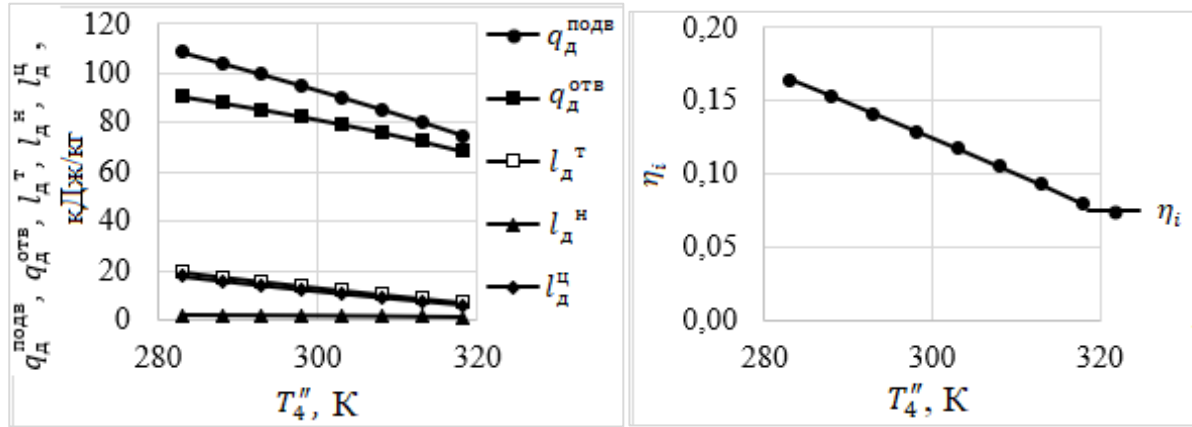


Рисунок 7 – Зависимость удельных показателей электрогенерирующего модуля $q_d^{\text{подв}}$, $q_d^{\text{отв}}$, $l_d^{\text{т}}$, $l_d^{\text{н}}$, $l_d^{\text{ц}}$ (определения даны в тексте) и зависимость внутреннего КПД ОЦР электрогенерирующего модуля η_i от температуры конденсации рабочего вещества T_4''

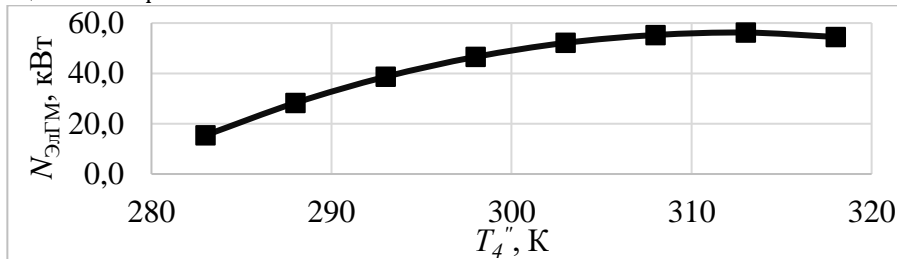


Рисунок 8 – Зависимость вырабатываемой электрической мощности электрогенерирующего модуля $N_{\text{элГМ}}$ от температуры конденсации рабочего вещества T_4''

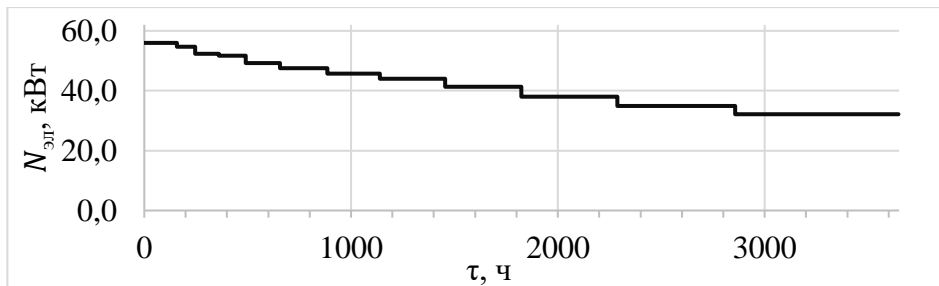


Рисунок 9 – График выработки электрической мощности электрогенерирующего модуля $N_{\text{эл}}$ в течение года (число часов работы в год τ) при температуре наружного воздуха $t_{\text{н}}$ от -28 до 0 °С

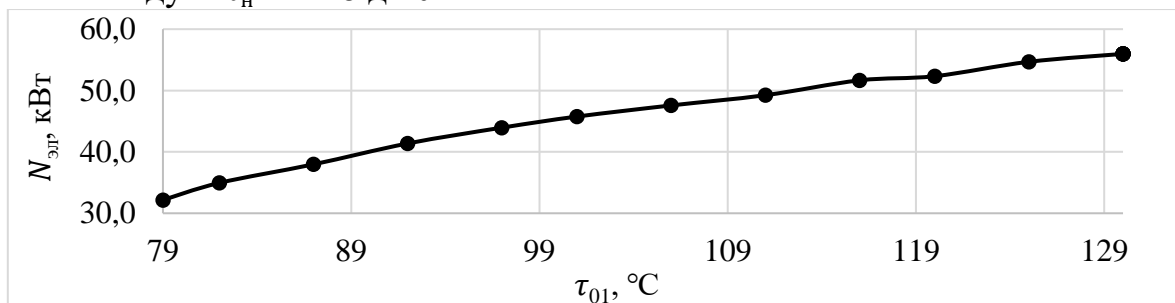


Рисунок 10 – Зависимость выработки электрической мощности $N_{\text{эл}}$ от температуры источника теплоты τ_{01}

Проведен анализ и даны рекомендации по выбору типа расширительного устройства в зависимости от диапазона вырабатываемой электрической мощности и типа рабочего вещества: для исследуемой установки ЭлГМ, вырабатывающей от 30 до 60 кВт электрической мощности, предлагается использовать расширительное устройство винтового или спирального типа.

Проведена технико-экономическая оценка электрогенерирующего модуля при утилизации низкопотенциального источника теплоты (и ВЭР в том числе) с расчетом дисконтированного срока окупаемости, приведенного на рисунке 11, который составил 7,8 лет, а чистый поток платежей при реализации проектируемой установки был оценен величиной 121 тыс. руб. в год.

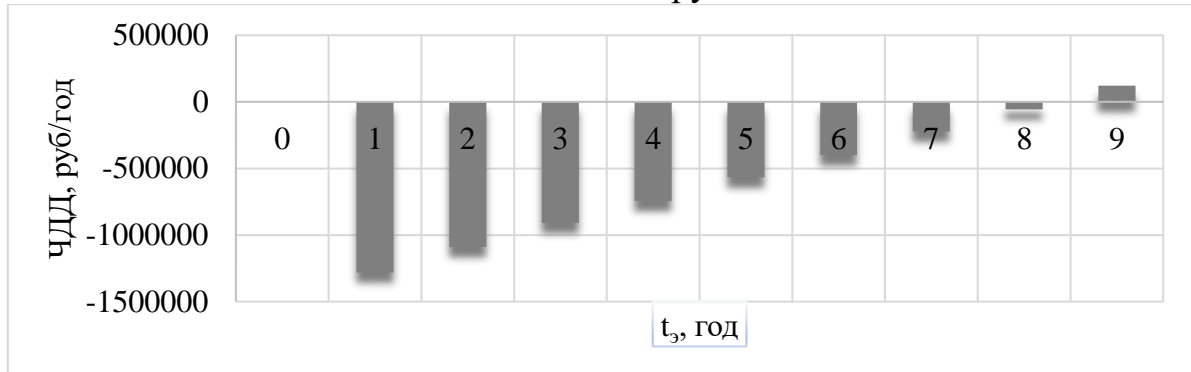


Рисунок 11 – Изменение чистого дисконтированного дохода (ЧДД), руб. в течение времени эксплуатации t , установки

В четвертой главе проведен эксергетический анализ термодинамической эффективности электрогенерирующего модуля. Выбранный метод позволил сопоставить энергетические потоки разных видов, оценить степень термодинамического совершенства системы и ее отдельных узлов, определить внутренние и внешние потери от необратимости в установке и ее частях. Для каждого элемента контура электрогенерирующего модуля (парогенератор, турбина, регенератор, конденсатор, насос) на i -м режиме работы тепловой сети рассчитаны затраченная (подводимая) и полезная эксергия, потери эксергии, эксергетический КПД элементов и установки в целом. Затраченная эксергия, Вт, в парогенераторе:

$$E_{\text{затр}i}^n = E_{01i} - E_{02i} \quad (1)$$

Полезная эксергия, Вт, в парогенераторе:

$$E_{\text{пол}i}^n = E_{1i} - E_{6di} \quad (2)$$

Потери эксергии, Вт:

$$D_i^j = E_{\text{затр}i}^j - E_{\text{пол}i}^j \quad (3)$$

Эксергетический КПД каждого элемента модуля:

$$\eta_i^{\text{экс}j} = \frac{E_{\text{пол}i}^j}{E_{\text{затр}i}^j} \quad (4)$$

Эксергетический КПД электрогенерирующего модуля:

$$\eta_{\text{ЭлГМ}i}^{\text{экс}} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{j=5} D_i^j}{E_{\text{ЭлГМ}i}} \quad (5)$$

Результаты анализа эффективности теплосиловых установок, утилизирующих низкопотенциальные тепловые потоки, показали, что при реализации предлагаемых технических решений по ЭлГМ в схему утилизации низкопотенциального источника теплоты становится возможным достижение высоких значений эксергетического КПД, как отдельных узлов модуля, так и всей установки. Эксергетический КПД основных аппаратов электрогенерирующего модуля находится в интервале 80–91%, а эксергетический КПД всего электрогенерирующего модуля – 46–50 % (в зависимости от сезонных параметров сетевой воды), что указывает на высокую степень термодинамического совершенства проектируемых процессов. На рисунке 12 приведена диаграмма эксергетических потоков электрогенерирующего модуля.

Первостепенной задачей при оценке удельных затрат условного топлива и их разнесения по видам продукции являлось определение исходных данных по затратам на производство тепловой энергии (на ТЭЦ либо районной котельной). Рассмотрены следующие варианты (везде размерность кг у. т./кВт·ч):

1) Расчет по $b_{ТЭЦ}^{отп}=0,065$, полученному для ТЭЦ эксергетическим методом, дает $b_N=0,366$ и $b_T=0,031$ – также эксергетическим методом;

2) Расчет по $b_{ТЭЦ}^{отп}=0,083$ для ТЭЦ, полученному традиционным методом ОРГРЭС, дает $b_N=0,467$ и $b_T=0,039$ – эксергетическим методом;

3) Расчет по $b_{ТЭЦ}^{отп}=0,083$ для районной котельной с учетом КПД котла дает $b_N=0,777$ и $b_T=0,065$ – эксергетическим методом. Для установок малой энергетики различной компоновочной конфигурации расчет разнесения затрат рекомендовано проводить по эксергетическому методу. Метод распределения ОРГРЭС следует применять только для расчета исходных данных.

Рассмотрен в качестве альтернативного источника автономной генерации электрической и тепловой энергии блок газопоршневых агрегатов (ГПА). При схожей энергетической эффективности ГПА (только с присоединенной системой утилизации теплоты выхлопных газов, а также теплоты, отводимой при охлаждении блока цилиндров и масла) преимущество электрогенерирующего модуля на базе ОЦР проявляется в экологической, технологической (отсутствие пожароопасных компонентов) безопасности.

Данные выводы подтвердили высокую потенциальную конкурентоспособность комбинированных электрогенерирующих установок на основе ОЦР по сравнению с традиционными газовыми и дизельными поршневыми агрегатами.

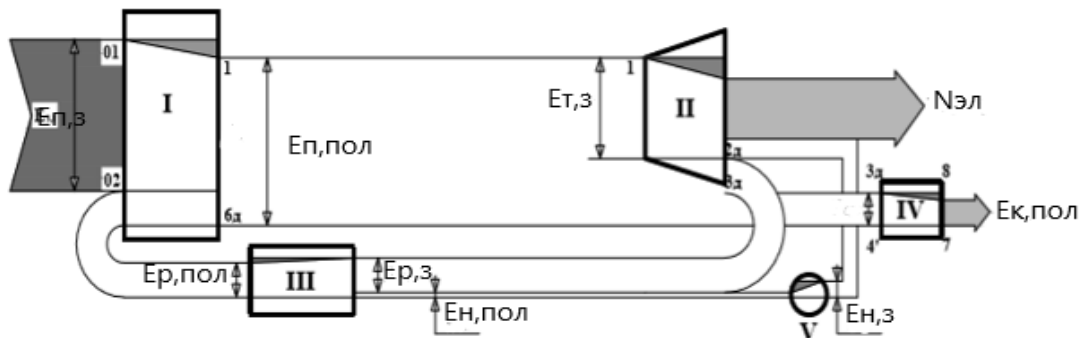


Рисунок 12 – Диаграмма эксергетических потоков при преобразовании энергии в электрогенерирующем модуле

В пятой главе проведено расчетно-экспериментальное исследование процесса конденсации октафторпропана в пластинчатом теплообменнике, в ходе которого построена математическая модель конденсации для расчета локальных значений коэффициента теплоотдачи на участке ламинарного режима течения пленки конденсата. Схема процесса приведена на рисунке 13.

В основе расчетной модели пленочной конденсации принимались следующие уравнения.

Дифференциальное уравнение расхода в пленке конденсата

$$\frac{dG(x)}{dx} = \frac{q(x)}{r} \quad (6)$$

где r , кДж/кг – теплота парообразования октафторпропана; $q(x)$, Вт/м² – локальная плотность теплового потока через пленку конденсата.

Закон Фурье

$$q_y = -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \quad (7)$$

Уравнение движения пленки конденсата для контрольного объема dV

$$g(\rho_l - \rho_v)dx(b_i - y) + \tau_s dx + (-\tau(y))dx = 0 \quad (8)$$

где g , м/с² – ускорение свободного падения; $\tau(y)$, Н/м² – касательное напряжение в пленке, определяемое законом трения Ньютона.

В результате решения системы дифференциальных уравнений (6 – 8) на основе экспериментальных значений расхода и теплофизических параметров октафторпропана получены значения локальных безразмерных показателей $Nu_{i,x}$, $Re_{i,x}$ для случаев движения ламинарной сдвиговой и ламинарной гравитационной пленки конденсата. Функциональная зависимость рассчитанных критериальных показателей эффективности теплообмена при конденсации в микроканале в случае ламинарной сдвиговой пленки конденсата выражена в виде соотношения:

$$Nu_{s,x} = C_s Re_{s,x}^{n_s} \varepsilon_v \quad (9)$$

где $C_s = 0,144$, $n_s = -0,301$ – определены в результате аппроксимации рассчитанных значений $Nu_{s,x}$, $Re_{s,x}$ при движении ламинарной сдвиговой пленки конденсата, ε_v – поправка на волновое движение ламинарной пленки конденсата.

Функциональная зависимость рассчитанных критериальных показателей эффективности теплообмена в случае движения ламинарной гравитационной пленки конденсата представлена в виде соотношения:

$$Nu_{g,x} = C_g Re_{g,x}^{n_g} \varepsilon_v \quad (10)$$

где $C_g = 1,296$, $n_g = -0,293$ – определены в ходе аппроксимации рассчитанных значений $Nu_{s,x}$, $Re_{s,x}$ при движении ламинарной гравитационной пленки конденсата.

На рисунке 14 приведена зависимость толщины сдвиговой пленки конденсата b_i , м и локального безразмерного коэффициента теплоотдачи $Nu_{g,x}$ от числа Рейнольдса $Re_{g,x}$ для случая движения ламинарной гравитационной пленки конденсата.

Проведена аппроксимация, в результате которой получены значения локального коэффициента теплоотдачи при конденсации октафторпропана в микроканале на участке ламинарного режима течения пленки конденсата, приведенные графически на рисунке 15.

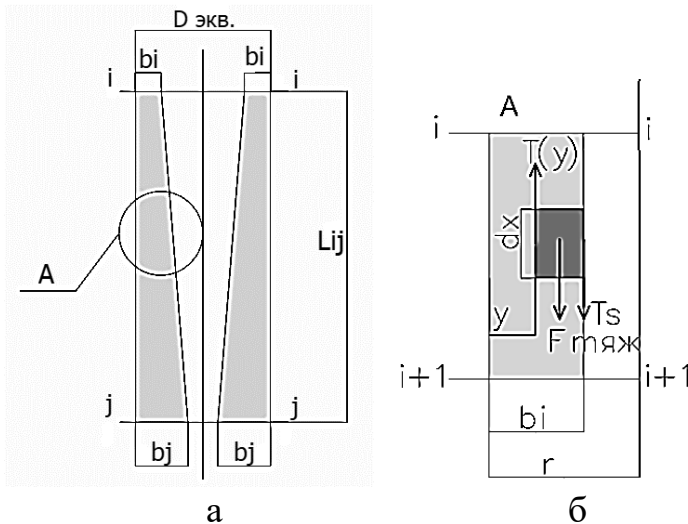


Рисунок 13 – а) Схема конденсации октафторпропана в микроканале; б) Пояснение к схеме с описанием сил, действующих на элемент пленки конденсата

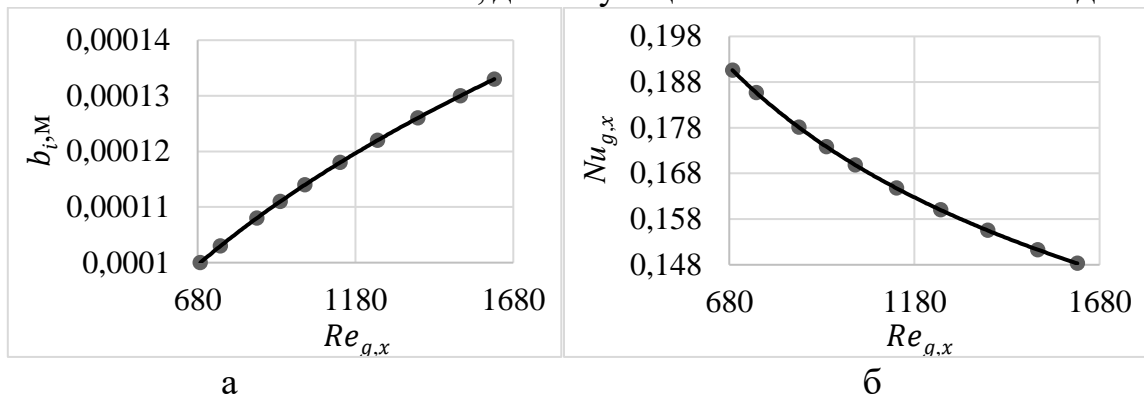


Рисунок 14 – а) Зависимость толщины ламинарной гравитационной пленки конденсата b_i от числа Рейнольдса $Re_{g,x}$; б) Зависимость локального числа Нуссельта $Nu_{g,x}$ от числа Рейнольдса $Re_{g,x}$ для ламинарной гравитационной пленки конденсата

Определение коэффициента теплоотдачи двухфазного потока в канале в процессе конденсации проводилось по моделям Каваллини (2002), Бэндауэра (2006) и Добсона и Чато (1998). В качестве наиболее обоснованной методики рекомендуется использовать модель Каваллини, являющуюся наиболее универсальной. Значения коэффициентов теплоотдачи, рассчитанные по этим методикам, далее верифицировались со значениями, полученными по экспериментальным данным испытательного циркуляционного стенда на октафторпропане и рассчитанными по формулам (11 – 19). Принципиальная гидравлическая схема стенда приведена на рисунке 16.

Расход октафторпропана определен по тепловому балансу конденсатора:

$$m_{C3F8}^i (h_{10} - h_{кж}) = G_{хвс}^i c_p^B (t_{15} - t_{14}) \quad (11)$$

где m_{C3F8}^i , кг/с – массовый расход октафторпропана; $h_{10}, h_{кж}$ – значения энтальпии октафторпропана на входе в конденсатор (точка 10) и энтальпии полностью сконденсировавшегося рабочего вещества; $G_{хвс}^i$, кг/с – средний массовый расход охлаждающей воды; $c_p^B, \frac{кДж}{кг \cdot К}$ – среднее значение изобарной теплоемкости воды при температурах воды на входе $t_{14}, ^\circ\text{C}$ и выходе $t_{15}, ^\circ\text{C}$ из конденсатора. Измерения

расхода охлаждающей воды производились с помощью акустического расходомера типа «Днепр-7».

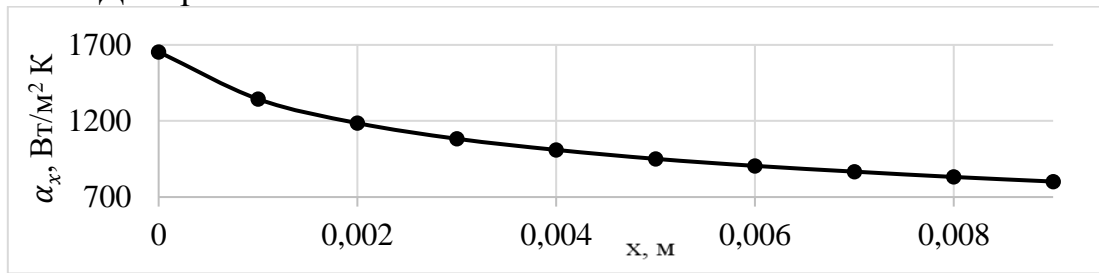


Рисунок 15 – Изменение локального коэффициента теплоотдачи α_x на рассматриваемом участке канала x .

Теплота, отданная охлаждающей воде в конденсаторе, Q_K , Вт:

$$Q_K = m_{C_3F_8}^i (h_{10} - h_{кж}), \text{ Вт} \quad (12)$$

Среднеинтегральный коэффициент теплопередачи для конденсатора:

$$k_K^{cp} = \frac{Q_K}{F_K \cdot \Delta t_K^{лог}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (13)$$

Эквивалентный диаметр проходного сечения при расчетах по опытным данным принимался равным расстоянию между пластинами:

$$d_э = \frac{2 \cdot (b - n\delta)}{n + 1} \quad (14)$$

Коэффициент теплоотдачи от внешней стенки канала к нагреваемой среде (вода) при числе Рейнольдса $Re_w < 2300$ ($Re_{кр}$), равном:

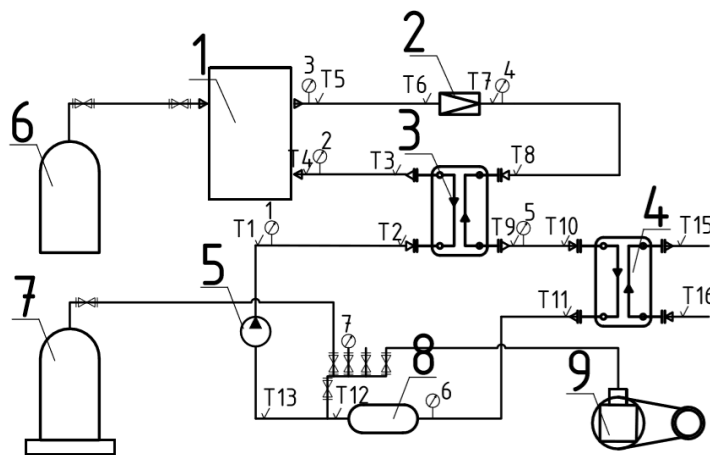
$$Re_w = \frac{w d_э}{v_w} = 199,38 \quad (15)$$

и длине начального термического участка $l_{HT} = 0,368$ м, определяемой как:

$$l_{HT} = 0,055 Re_w Pr_w d_э \quad (16)$$

определяется при $\overline{Nu}_w = 3,66$:

$$\alpha_w = \frac{\overline{Nu}_w \lambda_w}{d_э} \quad (17)$$



1 – котел каталитического горения на природном газе, 2 – дроссельное устройство, 3 – теплообменник – рекуператор, 4 – теплообменник – конденсатор, 5 – насос – дозатор, 6 – топливный бак, 7 – система заправки стенда октафторпропаном (C_3F_8), 8 – бак слива конденсата, 9 – вакуумный насос.

Рисунок 16 – Принципиальная гидравлическая схема стенда и схема измерений рабочих параметров стенда

Средний по длине канала коэффициент теплоотдачи при конденсации октафторпропана рассчитывался по известному соотношению:

$$\alpha_r = \left(\frac{1}{k_K^{cp}} - \frac{1}{\alpha_w} - \frac{\delta}{\lambda} \right)^{-1} \quad (18)$$

Площадь поверхности теплообмена конденсатора:

$$F_K = n \cdot h \cdot a, \text{ м}^2 \quad (19)$$

В таблице 1 приведены теплотехнические характеристики конденсатора для одного режима по результатам испытаний.

Таблица 1 – Теплотехнические характеристики конденсатора по результатам испытаний

$G_{\text{вода}}^{cp}$ кг/с	$m_{C_3F_8}^i$ кг/с	Q_K кВт	t_b °C	w м/с	Re	Nu	α_w Вт/(м ² К)	α_r Вт/(м ² К)
0,372	0,0595	5,60	9,71	0,075	164,20	3,66	603	774

В таблице 2 приведены результаты верификации значений средних коэффициентов теплоотдачи, рассчитанных по исследуемым методикам, со значениями, полученными по экспериментальным данным.

Расчет средних коэффициентов теплоотдачи со стороны октафторпропана по трем моделям конденсации показал расхождение в диапазоне от 1,2 до 11,6 % в сравнении с значениями коэффициента теплоотдачи, определенными по экспериментальным данным. Наименьшее расхождение достигается при расчете средних коэффициентов теплоотдачи по модели Каваллини. Данная методика рекомендована к использованию на этапах проектирования конденсационных аппаратов пластинчатого типа широкого ряда мощностей.

Таблица 2 – Результаты расчета теплообменных характеристик по исследуемым моделям конденсации

Наименование модели	Значение коэффициента теплоотдачи, $\alpha_r, \text{ Вт/м}^2\text{К}$	Расхождение с экспериментальным значением коэффициента теплоотдачи, %
Модель Каваллини (2002)	765	1,16
Модель Бэндауэра (2006)	685	11,56
Модель Добсона и Чато (1998)	784	1,27

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении диссертационной работы получены следующие результаты.

1. Сформулированы ключевые предложения, необходимые для разработки системы электрогенерирующего модуля (ЭлГМ) на утилизации низкопотенциальных ВЭР, методики выбора низкокипящего рабочего вещества и конфигурации термодинамического цикла.

2. Разработаны схемы применения ЭлГМ на октафторпропане для утилизации низкопотенциальной теплоты ВЭР на примере химического промышленного предприятия и в системе теплового пункта в зоне эксплуатации предприятия на

источнике низкого температурного потенциала, сформированы технический облик основных аппаратов установки, а также рекомендации по выбору типа расширителя ЭлГМ при утилизации низкопотенциальных ВЭР малой мощности.

3. Выбраны низкокипящие рабочие вещества (октафторпропан, октафторциклобутан) для турбинного контура на основе результатов термодинамического анализа, определены оптимальные параметры рабочих режимов ЭлГМ с точки зрения достижения высоких показателей термодинамической эффективности основных аппаратов и всей установки при условии максимальной выработки электрической мощности, что подтверждает экологическую и энергетическую эффективность исследуемой установки.

4. Проведен расчет затрат условного топлива при совместной выработке тепловой и электрической энергии на основе методов эксергетического анализа, а также расчет технико-экономической оценки эффекта применения ЭлГМ на ОЦР малой мощности при утилизации низкопотенциальных ВЭР, подтверждающей экономическую эффективность исследуемой установки.

5. Сформирован технический облик конденсатора ЭлГМ в результате расчетно-экспериментального исследования теплообменных характеристик и разработана математическая модель расчета локальных значений коэффициента теплоотдачи при конденсации фторуглеродного рабочего вещества.

Результаты диссертационного исследования могут быть использованы следующим образом.

1. Разработанная оригинальная схема ЭлГМ в системе теплового пункта промышленного предприятия, обеспечивающая высокоэффективную совместную выработку электрической и тепловой энергии, может быть использована в качестве резервного источника электроснабжения при аварийных ситуациях в электросети.

2. Результаты исследования ЭлГМ на ОЦР на октафторпропане в системе теплового пункта промышленного предприятия могут быть применены для расчета энергетических характеристик исследуемой установки на утилизации низкопотенциальных ВЭР промышленных предприятий.

3. Результаты теплотехнических испытаний циркуляционного стенда на октафторпропане формируют экспериментальную базу для оценки энергетической эффективности установки при использовании новых рабочих веществ и для разработки подобных систем широкого диапазона мощности.

4. Результаты исследований могут быть использованы научными и проектными организациями при проектировании высокоэффективных когенерационных установок совместного производства электрической и тепловой энергии.

Перспективы дальнейшей разработки имеют следующие направления:

- разработка методики проектирования типов расширителей установок малой и средней мощности;
- исследование теплообменных характеристик регенератора и парогенератора;
- разработка системы автоматизированного управления ЭлГМ в системе ЦТП;
- разработка модулей ЭлГМ различного диапазона мощностей, температурных уровней источника теплоты и объектов утилизации.

Список работ, в которых опубликованы основные положения диссертации:

В изданиях из перечня ВАК Минобрнауки

1. Очков В.Ф. Анализ использования органического цикла Ренкина при утилизации тепла выхлопных газов мини-ТЭЦ / В.Ф. Очков, Г.М. Катенев, В.Е. Знаменский, **А.М. Львова** // Энергосбережение и водоподготовка. – 2015. – № 3 (95). – С. 45 – 49.
2. Сухих А.А. Выбор типа микротурбины для электрогенерирующего модуля в составе ЦТП / А.А. Сухих, **А.М. Львова**, Ю.В. Куцева // Новое в российской электроэнергетике. – 2018. – №12. – С. 23 – 34.
3. **Львова А.М.** Эксергетический анализ эффективности электрогенерирующего модуля в составе центрального теплового пункта / А.М. Львова, А.А. Сухих // Новое в российской электроэнергетике. – 2019. – №4. – с. 6 – 13.
4. Сухих А.А. Расчетно-экспериментальное исследование процесса конденсации октафторпропана в пластинчатом теплообменнике электрогенерирующего модуля / А.А. Сухих, **А.М. Львова**, В.А. Милютин // Энергосбережение и водоподготовка. – 2019. – № 2 (118). – с. 67 – 73.

В зарубежном издании, индексируемом в базе данных Scopus

5. Sukhikh A.A. Especially the choice and use of working substances in power plants of small capacity / A.A. Sukhikh, V.A. Milyutin, **A.M. Lvova** // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – № 891. – p. 1406 – 1415.
6. Sukhikh A.A. Analysis of the energy efficiency of the implementation power electric generated modules in the CHS / A.A. Sukhikh, V.A. Milyutin and **A.M. Lvova** // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – №891. – p. 1 – 6.

Патенты на изобретения РФ

7. Рос. Федерация: патент № 2674060 Тепловой пункт системы отопления и горячего водоснабжения / заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ». – № 2018109122, заявл. 14.03.18; опубл. 04.12.18., Бюл. №34. – 13 с. / А.А. Сухих, **А.М. Львова**

Материалы конференций

8. Сухих А.А. Анализ энергетической эффективности применения электрогенерирующих модулей в составе ЦТП / А.А. Сухих, В.А. Милютин, **А.М. Львова** // Материалы Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 9 – 11 октября 2017 г.): в 2 т. Т. 2. – М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – С. 46 – 47.
9. Сухих А.А. Особенности выбора и применения рабочих веществ в энергетических установках малой мощности / А.А. Сухих, В.А. Милютин, **А.М. Львова** // Материалы Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 9 – 11 октября 2017 г.): в 2 т. Т. 2. – М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – С. 48 – 49.
10. **Львова А.М.** Анализ выбора оптимальной температуры конденсации неводяного рабочего вещества цикла Ренкина / А.М. Львова, А.А. Сухих // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать четвертая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (15 – 16 марта 2018 г., Москва): Тез. докл. – М.: ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2018. – С. 659.