Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
Государственная организация высшего профессионального образования
«Донецкий национальный университет экономики и торговли
имени Михаила Туган-Барановского»

На правах рукописи

Карнаух Виктория Викторовна

РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ОБОРОТНОЙ ВОДЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЕЕ ТЕПЛОТЫ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Донецк – 2022

Работа выполнена в Государственной организации высшего профессионального образования «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского», г. Донецк

Научный консультант: доктор технических наук, профессор **Бирюков Алексей Борисович**

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Защита состоится «___» _____ 2023г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 01.016.03 при ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет» по адресу: 283001, г. Донецк, проспект Гурова, 14, Главный корпус, ауд. 603.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24, http://science.donnu.ru.

Автореферат разослан «___»_____ 20____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.016.03,
канд. физ.-мат. наук А.Б. Мироненко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время почти половина всей тепловой энергии, расходуемой в промышленности, включая и пищевую, выбрасывается в атмосферу и водный бассейн в виде отводимой теплоты. По некоторым оценкам, выбросы низкопотенциальной теплоты промышленностью составляет около 5 млрд ГДж в год. При этом промышленные предприятия потребляют огромное количество воды для охлаждения машин и рабочих тел в различных технологических процессах.

В связи с этим активизировались разработки научно-прикладных проектов как российских, так и зарубежных авторов по рациональному использованию такого энергетического ресурса как вторичная теплота (температура ресурса 25…300 ^{o}C). Следует отметить, что использование низкопотенциальной теплоты как фактора энергосбережения – одна из народно-хозяйственных задач. Работы в этом направлении подчеркивают экологизационную трансформацию промышленности, что в полной мере соответствует энергетической стратегии развития Российской Федерации и Донецкой Народной Республики.

Теплота оборотной воды предприятий пищевых производств (ППП) отводится естественным (испарительным) или искусственным охлаждением. Комплексный подход к использованию теплового потенциала оборотной воды, учитывающий ее температуру и расход, позволит обеспечить экономию воды, снижение себестоимости выпускаемой продукции и охрану близлежащих территорий за счет уменьшения или полного исключения капельного уноса воды, предотвращения теплового загрязнения окружающей среды.

Однако вопрос поиска рациональных параметров существующих и проектируемых систем оборотного водоснабжения ППП с учетом обеспечения возможности полезного использования теплоты оборотной воды изучен недостаточно. Поэтому тема исследования, посвященная развитию научных основ совершенствования процессов охлаждения оборотной воды и использования ее теплоты на ППП является актуальной.

Степень разработанности темы. Теоретические и прикладные аспекты усовершенствования водоохлаждающих систем испарительного типа представлены в работах зарубежных и отечественных ученых, таких как: Bakar Abu, R.E. Foster, N. J. Stoitchkov, G.J. Dimirov, В.С. Галустов, А.В. Дорошенко, В.С. Пономаренко, В.П. Кравченко, С.К. Сосновский, А.М. Каган, А.А. Городилов.

Значительный вклад в создание и совершенствование методологии поиска организационно-технических решений утилизации техногенной вторичной теплоты на промышленных объектах и повышения эффективности промышленных систем оборотного водоснабжения внесли следующие авторы: С.И. Ноздрин, В.Н. Стабников, А.В. Овсянников, П.А. Трубаев, М.Н. Шит, Д.Г. Закиров, А.Б. Бирюков, С.А. Горожанкин, С.И. Монах, О.В. Крюков, С.Л. Елистратов, Ю.В. Овчинников, Е.Ю. Иващенко, Jafar Sarkar, Marco Corradi, Alptug Yataganbaba, Mustafa Aktaş, Vincent Lemort, İ.F.Wang и др.

Среди исследователей, работы которых посвящены термодинамическому моделированию и развитию концептуальных парокомпрессионных технологий преобразования теплоты, следует выделить Di Wu, Yuefen Gao, R.S. Mishra, Mark O.McLinden, Gökmen Demirkaya, A. Sinan Karakurt, F. Schlosser, И.Г. Чумака, В.А. Мазура, В.П. Железного, А.А. Дзино, Т.В. Морозюк, В.С. Мартыновского и др.

Несмотря на значительное количество научных работ в этом направлении, спектр вопросов, которые необходимо решать в рамках предприятий пищевых производств, требует углубленных теоретических и экспериментальных исследований. Из практики известно, что надежность и эффективность работы вентиляторных градирен повышается при переходе на использование насадок с подвижным слоем, однако определение рациональных параметров этой технологии требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований, направленных на описание гидродинамических особенностей структуры потока в трехфазной среде. Еще более остро стоит задача проведения исследований в плане полезного использования теплоты оборотной воды для теплоснабжения и производства электроэнергии. При этом требуется проработка вариантов решения задачи с повышением температурного потенциала воды (например, при помощи теплового насоса) и без него.

Таким образом, разработка теоретико-прикладных основ для обоснования направлений использования теплового потенциала оборотной воды ППП, совершенствования работы водоохлаждающих устройств, нахождения рациональных конструктивных параметров и компоновочных решений промышленных систем оборотного водоснабжения, обеспечивающих высокую эффективность, экологичность, надежность и бесперебойность эксплуатации будет способствовать решению важной народно-хозяйственной проблемы по утилизации техногенной низкопотенциальной теплоты.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является развитие научно-технических основ повышения эффективности промышленных систем оборотного водоснабжения предприятий пищевых производств за счет совершенствования тепломассообменных процессов, протекающих в водоохлаждающих устройствах, и обоснования рациональных параметров технологии утилизации избыточной теплоты оборотной воды.

Для достижения поставленной цели необходимо сформулировать и решить следующие **задачи**:

- проанализировать современное состояние и перспективы развития систем оборотного водоснабжения (СОВ) предприятий пищевых производств, выявить актуальные направления полезного использования теплоты оборотной воды и совершенствования работы водоохлаждающих устройств (ВОУ);
- разработать универсальный научный инструментарий для исследования влияния температуры охлаждающей воды на эффективность работы теплотехнологического оборудования в условиях пищевых производств;
- изучить процессы совместного тепломассообмена при испарительном охлаждении оборотной воды в градирне с подвижными насадками и

определить рациональные значения технологических и конструктивных параметров водоохлаждающих устройств;

- определить возможность использования теплоты воды в цикле оборотного водоснабжения без повышения ее температурного уровня для решения задач теплоснабжения и предложить конкретные технические решения;
- развить научно-методологический подход к расчету и прогнозированию работы парокомпрессионных теплонасосных установок (ПТНУ), работающих на хладагентах четвертого поколения и использующих оборотную воду ППП как низкопотенциальный ресурс, с использованием современных эколого-энергетических показателей;
- разработать систему критериев для комплексной оценки эффективности систем полезного использования теплоты оборотной воды;
- обосновать возможность электрогенерации за счет использования теплоты оборотной воды ППП, разработать технические решения и оценить их эффективность;
- выполнить экономическую оценку предложенных решений по совершенствованию работы водоохлаждающих устройств и полезному использованию теплоты оборотной воды.

Объектом исследований являются водоохлаждающие устройства систем оборотного водоснабжения пищевых производств и технологии утилизации избыточной теплоты оборотной воды.

Предметом исследования выступают теоретические, методологические и прикладные основы совершенствования процессов охлаждения оборотной воды и использования ее теплоты на предприятиях пищевых производств.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с паспортом научной специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика в части пунктов: 3.1. «Разработка научных основ, методов и средств интенсивного сбережения энергетических ресурсов в промышленных теплоэнергетических устройствах и использующих теплоту в системах и установках»; 3.5. «Оптимизация параметров тепловых технологических процессов и разработка оптимальных схем установок, использующих теплоту, с целью экономии энергетических ресурсов …»; 3.6. «Разработка и совершенствование теплотехнических аппаратов и установок, систем охлаждения…тепломассообменного оборудования…»; 3.7. «Разработка теоретических аспектов и методов интенсивного энергосбережения в тепловых технологических системах, в том числе использования вторичных энергоресурсов в системах производства…»; 3.10. «Разработка и исследование методов преобразования в работу низкопотенциальной теплоты, повышения ее потенциала в тепловых машинах».

Научная новизна полученных результатов заключается в комплексном подходе к формированию научно-технических основ повышения эффективности промышленных систем оборотного водоснабжения предприятий пищевых производств за счет совершенствования тепломассообменных процессов, протекающих в водоохлаждающих устройствах, и обоснования рациональных параметров технологий утилизации избыточной теплоты оборотной воды.

Наиболее значимые результаты, характеризующиеся новизной, заключаются в следующем:

1. Впервые предложен научно-обоснованный метод, позволяющий при проектировании (эксплуатации) предприятий, использующих водяные конденсаторы и теплообменные аппараты, охлаждаемые оборотной водой, определять (прогнозировать) реальные количественные характеристики работы этих аппаратов при различных условиях эксплуатации (расход охлаждающей воды и ее входная температура), что позволит сформулировать точные требования к характеристикам водоохлаждающих устройств системы оборотного водоснабжения.

2. Получило дальнейшее развитие моделирование процессов совместного тепломассообмена при испарительном охлаждении оборотной воды в градирне с подвижными насыпными насадками, что позволило установить зависимости по определению важнейших гидродинамических характеристик, необходимых для инженерных расчетов подобных водоохлаждающих аппаратов. Экспериментально установлено, что интенсификация тепломассообмена достигается специфическим характером движения жидкости в аппаратах с подвижной насадкой; определен оптимальный диапазон плотности насадочного слоя $\rho_{энII}$ ($\rho_{эн}$ = 200…700 кг/м^3), отличающийся широким диапазоном скорости газа, приемлемыми значениями каплеуноса и сравнительно небольшой динамической высотой слоя.

3. Получил дальнейшее развитие научно-методологический подход для расчета и прогнозирования работы ПТНУ, работающих на хладагентах четвертого поколения и использующих оборотную воду ППП как низкопотенциальный ресурс, на основе современных эколого-энергетических показателей, что позволило разработать набор системных рекомендаций по выбору оптимальных параметров тепловых насосов.

4. Впервые при помощи метода нечетких множеств, основанного на многокритериальном подходе к выбору решения, разработана методика рационального выбора рабочих тел для энергопреобразующих систем, включая ПТНУ, использующих в качестве источника теплоту оборотной воды ППП, что будет способствовать разработке концептуальных низкотемпературных технологий преобразования энергии с учетом компромисса между энергоэффективностью, экологическими ограничениями и экономическими показателями.

5. Получили дальнейшее развитие подходы к оценке эффективности энергосберегающих проектов за счет разработки системы критериев для комплексной оценки полезного использования теплоты оборотной воды, а именно: степень нереализованного потенциала энергосбережения, коэффициент энергетической эффективности способа утилизации теплоты, относительная стоимость сэкономленных энергоносителей, что позволяет выявить наиболее оптимальные схемные решения по энергосбережению.

6. Впервые предложены концептуальные положения по комбинированной утилизации оборотной воды на предприятиях пищевых производств, которые позволяют генерировать электроэнергию и обеспечивать нагрузки горячего

водоснабжения, что позволит сформировать стратегические ориентиры модернизации теплового хозяйства предприятиях пищевых производств.

Теоретическая значимость работы определяется актуальностью цели и задач исследования, достигнутым уровнем разработанности исследуемых проблем, научной новизной результатов исследования, и заключается в следующем:

- разработан научно-обоснованный метод, позволяющий при проектировании (эксплуатации) предприятий, использующих водяные конденсаторы и теплообменные аппараты, охлаждаемые оборотной водой, определять (прогнозировать) реальные количественные тепловые характеристики работы этих аппаратов при различных условиях эксплуатации;
- разработана концептуальная модель процессов совместного тепломассообмена при испарительном охлаждении оборотной воды в градирне с подвижными насадками и с ее помощью установлены рациональные параметры эксплуатации градирен с подвижными насадками;
- разработан методологический подход для количественного определения значений современных эколого-энергетических показателей применительно к расчету и прогнозированию работы парокомпрессионных теплонасосных установок, работающих на хладагентах четвертого поколения и использующих оборотную воду ППП как низкопотенциальный ресурс;
- предложен комплексный показатель $D_{\text{х.а.абс}}$, позволяющий осуществить рациональный выбор рабочего тела энергопреобразующих систем в заданных производственно-технологических условиях;
- предложена и описана система критериев для комплексной оценки эффективности систем оборотного водоснабжения с точки зрения полезного использования теплоты оборотной воды;
- разработаны и исследованы схемы комбинированной утилизации оборотной воды на ППП на базе энергопреобразующих систем (ПТНУ и ОЦР).

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные научно-обоснованные положения могут быть применены как на стадии проектирования новых, так и при реконструкции существующих систем оборотного водоснабжения ППП для решения следующих задач:

- повышение надежности и эффективности работы водоохлаждающих устройств при переходе на градирни с использованием подвижных насадок за счет установления обоснованных в работе рациональных конструктивных и технологических параметров этих устройств;
- использование теплоты оборотной воды для теплоснабжения без повышения ее температурного потенциала за счет разработки соответствующих технических решений;
- использование теплоты оборотной воды для теплоснабжения при повышении ее температурного потенциала при помощи теплового насоса за счет рационального выбора используемых рабочих тел для типичных условий ППП и поддержания рациональных технологических параметров процессов;

- производство электроэнергии при утилизации теплоты оборотной воды в предложенной технологической схеме процесса с учетом поддержания установленных рациональных значений технологических и конструктивных параметров.

Выводы и рекомендации практической направленности, предложенные в диссертационной работе, внедрены на профильных предприятиях: ООО ФИРМА «КОЛБИКО» в рамках хоздоговорной темы № 03-02-хт/2020 от 15.04.2020 г. «Анализ теплового потенциала систем оборотного водоснабжения предприятий пищевых производств и подбор теплонасосных систем для его практического использования» (акт внедрения от 25.06.2020 г., подписан ген.директором А.В. Гришко, г. Донецк); в ООО «Донецкий комбинат замороженных продуктов» (акт об использовании результатов работы от 28.01.2022г., подписан директором по производству Е.В. Гороховатским, г. Макеевка); в ФГАОУВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (акт об использовании результатов работы от 31.10.2022, утв. первым проректором по НИР д-р. техн.наук, профессом А.Б. Прокофьевым, г. Самара).

Результаты теоретико-методологического характера диссертации используются в учебном процессе ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговле имени Михаила Туган-Барановского» при изложении дисциплин: «Машины и системы низкопотенциальной энергетики», «Теплоиспользующие холодильные машины и тепловые насосы», «Специальные главы термодинамики низкотемпературных систем» (справка № 02.01/1846 от 17.11.2022 г., подписана первым проректором ДОННУЭТ д-р.экон.наук, профессором Л.А. Омельянович).

Методология и методы исследования. Теоретической и методологической основой исследования являются базовые положения технической термодинамики и тепломассообмена, а также концептуальные положения фундаментальных и прикладных работ отечественных и зарубежных авторов по проблеме энерго-ресурсосбережения. Решение поставленных задач получено с использованием методов расчета процессов теплопередачи, проведения экспериментальных исследований, составления схемотехнических решений, эксергетического анализа, многокритериальной оптимизации, расчета циклов тепловых машин, анализа уровня энергоэффективности технологий.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод, позволяющий при проектировании (эксплуатации) предприятий, использующих водяные конденсаторы и теплообменные аппараты, охлаждаемые оборотной водой, определять (прогнозировать) действительные количественные характеристики работы этих аппаратов при различных условиях эксплуатации (расход охлаждающей воды и ее входная температура), а значит сформулировать точные требования к характеристикам водоохлаждающих устройств оборотной системы водоснабжения.

2. Концептуальная модель процессов совместного тепломассообмена при испарительном охлаждении оборотной воды в градирне с подвижными насыпными насадками.

3. Метод рационального выбора рабочих тел для энергопреобразующих систем, включая ПТНУ, использующих оборотную воду ППП как низкопотенциальный источник, с учетом современных эколого-энергетических показателей для их расчета и прогнозирования.

4. Система критериев для комплексной оценки полезного использования теплоты оборотной воды, а именно: степень использования теплоты в системе оборотного водоснабжения, нереализованный потенциал энергосбережения, коэффициент энергетической эффективности способа утилизации теплоты, относительная стоимость сэкономленных энергоносителей.

5. Концептуальные положения по комбинированной утилизации оборотной воды на предприятиях пищевых производств (ГР+ПТНУ, ГР+ОЦР), позволяющие производить электроэнергию и обеспечивать нагрузки горячего водоснабжения.

Личный вклад соискателя заключается в анализе существующих теоретических и экспериментальных работ по теме диссертации, постановке задач исследования; разработке расчетных методик; проведении расчетов; обработке и анализе полученных результатов; непосредственном участии в натурных испытаниях; формулировке выводов по работе, оформлении публикаций и апробации результатов исследований. В публикациях [1-2, 10, 18-20, 28, 31] соавторам (проф. Дорошенко А.В., проф. Мазуру В.А., доц. Данько В.П.) принадлежат участия в организации экспериментальных работ и обсуждении полученных результатов; в публикациях [11-15, 18, 20, 27, 30, 32, 35] в соавторстве с проф. Бирюковым А.Б. были систематизированы результаты исследований и раскрыта научная проблематика.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных научных положений, выводов и рекомендаций основана на использовании классических положений технической термодинамики, теплотехники и тепломассообмена, современных методов математического моделирования и математической статистики, использованием современных программных комплексов, результатов экспериментальных исследований, а также сопоставимостью с частными результатами других исследователей.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-практических отраслевых конференциях разного уровня, основными из которых являются: «Холод-2011: Проэкология и энергосбережение» (г. Санкт-Петербург, 2.02.2011 г.); «Вода в пищевой промышленности» (г. Одесса, 2011 г.); «Modern Technologies, in the Food Industry - 2012» (Республика Молдова, 1-3.11.2012г.); «Инновационные разработки в области техники и физики низких температур» (г. Москва, 11-13.12.2013г.); «IV.Geleneksel Gıdalar Sempozyumu» (г. Адана, Турецкая Республика, 17-19.04.2014 г.); «THERMAM 2014, 2016 Symposium on Thermophysical Properties for Technical Thermodynamics» (г. Измир, Турецкая Республика, 2014 г., 2016г.); «Minsk International Seminar «Heat Piper. Heat Pumps. Refrigerators. Power Sources» (г. Минск, Республика Беларусь, 7-10.09.2015 г., 10-13.09.2018 г.); 3rd International Conference on Thermophysical and Mechanical Properties of Advanced Materials (01-03.09.2016 г.); «Социально-экономическое развитие России» (г. Краснодар, 20-

21.04.2017 г.); «Экологическая ситуация в Донецком регионе: проблемы безопасности и рекультивации поврежденных территорий» (г. Донецк, 16-17.05.2017 г.); «Энергетические системы» (г. Белгород, 28.11.2017 г., 29-30.11.2018 г., 29-30.11.2019 г., 19-20.11.2020 г.); Международный научный форум «Инновационные перспективы Донбасса: инфраструктурное и социально-экономическое развитие» (г. Донецк, 22-25.05.2018 г., 24.05.2022 г.); научно-практическая конференция «Агропромышленная политика Донецкой Народной Республики» (г. Донецк, 30.05.2019 г.); пул международных конференций: «Современные процессы в пищевых производствах и инновационные технологии обеспечения качества пищевых продуктов» Национальная научно-практическая конференция с международным участием «Актуальные проблемы техники, технологии и образования» (г. Донецк, 15-16.11.2018 г.; г. Сочи, 25-28.01.2021 г., г. Сочи, 24-27.01.2022 г.); «Инновационные направления интеграции науки, образования и производства» (г. Керчь, 19-23.05.2021 г.); «Modern Kazakhstan: Reforms in Education and Science» (г. Алматы, Республика Казахстан, 14.10.2021г.); 16.th International Combustion Symposium (INCOS 2022) (general engineering section), (г. Айдын, Турецкая Республика, 09-11.09.2022 г.); ежегодные межкафедральные научно-технические семинары института пищевых производств ДОННУЭТ; межкафедральные научно-технические семинары кафедры технической теплофизики ДонНТУ (2021 г., 2022 г.).

Публикации. По результатам исследования опубликовано 40 научных работ. Среди публикаций 20 в реферируемых периодических изданиях, включенных в перечень ВАК ДНР, в том числе 2 статьи ВАК РФ и 3 статьи в изданиях, включенных в международную наукометрическую базу Scopus; 2 раздела в коллективных монографиях и 18 публикаций в других изданиях, включая материалы и тезисы международных научных конференций.

Структура диссертационной работы определяется поставленной целью и соответствует логической последовательности решения определенных автором задач исследования. Диссертация состоит из введения, семи разделов, заключения, списка литературы из 345 источников и приложений (объемом 30 страниц). Общий объем диссертации составляет 340 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы; сформулированы цель и задачи исследования, определены объект, предмет, методы исследования; раскрыта научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов; отображены результаты апробации диссертации; представлена публикационная активность, структура и объем работы.

В первом разделе **«Состояние научно-технической проблемы совершенствования тепломассообменных процессов и повышения уровня энергоэффективности в системах оборотного водоснабжения. Определение задач исследований»** с учетом современных тенденций развития последовательно рассмотрены теоретические и практические аспекты вопросов

совершенствования водоохлаждающих устройств, используемых в системах оборотного водоснабжения, а также генерации и рационального использования вторичных энергоресурсов (ВЭР) предприятий пищевой промышленности (ППП), включая тепловые.

Обращено внимание на необходимость создания научно-методологического инструментария, позволяющего с достаточной точностью прогнозировать технологические показатели работы оборудования в зависимости от температуры и расхода охлаждающей оборотной воды.

Рассмотрены современные направления совершенствования водоохлаждающих устройств систем оборотного водоснабжения в целом, и в частности применительно к условиям ППП. Обосновано, что перспективным является широкое применения на ППП вентиляторных градирен в подвижной насадкой. При этом обращено внимание на то, что для эффективного использования такого оборудования необходимо проведение исследований по уточнению закономерностей протекания тепломассообменных процессов и определению соответствующих рациональных значений конструктивных и технологических параметров.

Показано, что на многих предприятиях пищевой промышленности бросовые тепловые потоки жидкостей, идущие от технологического оборудования, повторно не используются для собственных нужд. Они, как правило, сбрасываются в канализационную систему или в местные градирни. Это относиться к заводам, которые вырабатывают спирт, производят пиво, безалкогольные напитки, молочную и масло-жировую продукцию, хлебобулочные изделия и т.п. При устойчивом росте цен на энергоносители все это в итоге приводит к увеличению удельных затрат на выпуск конечной продукции и услуг. Поэтому одной из основных задач комплексной модернизации теплового хозяйства ППП является внедрение мероприятий, направленных на снижение непроизводительных потерь энергии и наиболее полное использование вторичных ресурсов.

На наш взгляд, в первую очередь комплексный подход к использованию теплового потенциала оборотной воды, выраженный ее температурой и расходом, позволит обеспечить экономию воды, снижение себестоимости выпускаемой продукции и охрану близлежащих территорий за счет уменьшения или полного исключения капельного уноса воды.

В работе одновременно проведен анализ современного состояния, перспектив развития концептуальных технологий преобразования энергии оборотной воды, таких как теплонасосные установки и установки, работающие по органическому циклу Ренкина (ОЦР), в России и в мире, показана специфика их использования, определены мировые тенденции развития и области перспективных научных исследований.

На основании проведенного анализа обоснована необходимость решения научно-практических вопросов, связанных с обеспечением полезного использования теплоты оборотной воды в условиях ППП для теплоснабжения (с

повышением и без повышения температурного потенциала воды) и для выработки электроэнергии.

Во втором разделе **«Влияние температуры охлаждающей воды на эффективность работы теплотехнологического оборудования в условиях пищевых производств»** разработан научно-практический метод, позволяющий при проектировании (эксплуатации) предприятий, использующих водяные конденсаторы и теплообменные аппараты, охлаждаемые оборотной водой, определять (прогнозировать) реальные количественные характеристики работы этих аппаратов при различных условиях эксплуатации (расход охлаждающей воды и ее входная температура), а значит сформулировать точные требования к характеристикам водоохлаждающих устройств оборотной системы водоснабжения и прогнозировать поведение оборудования при изменении параметров охлаждающей воды, например при работе в нерасчетных условиях.

Доминирующими направлениями использования воды в системах оборотного водоснабжения на ППП являются:

- охлаждение конденсаторов и компрессоров холодильных установок;
- охлаждение воздушных безмасляных винтовых компрессоров;
- охлаждение вакуум-насосов;
- обеспечение технологического процесса в вакуум-выпарных аппаратах, конденсаторах, пастеризационно-охладительных установках.

Исследование влияния температуры и расхода охлаждающей воды на эффективность работы технологического оборудования в условиях ППП проведено на примере горизонтального кожухотрубного конденсатора с противоточной схемой движения теплоносителей (хладагента и охлаждающей воды), который является неотъемлемым элементом среднетемпературной аммиачной холодильной машины.

В результате расчетного исследования значение температуры охлаждающей воды на выходе из аппарата предложено рассчитывать из уравнения теплового баланса как функцию значения температуры воды на входе и ее расхода:

$$t_2'' = \frac{G_2 c_2 t_2' + kFt_{\text{кд}} - \dfrac{kFt_2'}{2}}{G_2 c_2 + \dfrac{kF}{2}}. \qquad (1)$$

где G_2 – массовый расход воды, кг/с; t_2', t_2'' – температура холодного теплоносителя на входе и выходе из аппарата (в нашем случае – вода), $t_1' = t_1'' = t_{\text{кд}}$ – температура горячего теплоносителя, °С; c_2 – удельная массовая теплоемкость холодного теплоносителя, Дж/(кг·К); k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м^2·К), F – площадь теплопередающей поверхности теплообменника, м^2.

Производительность аппарата по сконденсированному пару хладагента представлена как функция температуры охлаждающей воды на входе и расхода охлаждающей воды:

$$G_1 = \frac{kF(t_2'' - t_2')}{r_1}, \qquad (2)$$

где G_1 – массовый расход холодильного агента, кг/с; r_1 – удельная теплота парообразования хладагента, кДж/кг.

Таким образом, искомые величины: производительность аппарата по сконденсированному пару и температура охлаждающей воды на выходе являются функциями расхода охлаждающей воды и значения ее входной температуры.

Параметрический анализ реализован в программе автоматизированного проектирования Mathcad для следующих исходных данных: температура процесса изобарно-изотермической конденсации аммиака $t_1' = t_1''$ = 313,15 К; температура оборотной воды, подаваемой на конденсатор, имеет температуру на 3…5 К выше, чем температура по мокрому термометру окружающего воздуха; температура воды, покидающей конденсатор, не превышает 308 К; значения коэффициента теплоотдачи α_2 при турбулентном течении воды в трубе составляют 1000…8000 Вт/(м^2·К); диапазон значений коэффициента теплоотдачи α_1 составляет от 4000 до 12000 Вт/(м^2·К).

Графические зависимости, полученные на основании выражений (1) и (2) в программе Mathcad, показаны на рисунках 1-4.

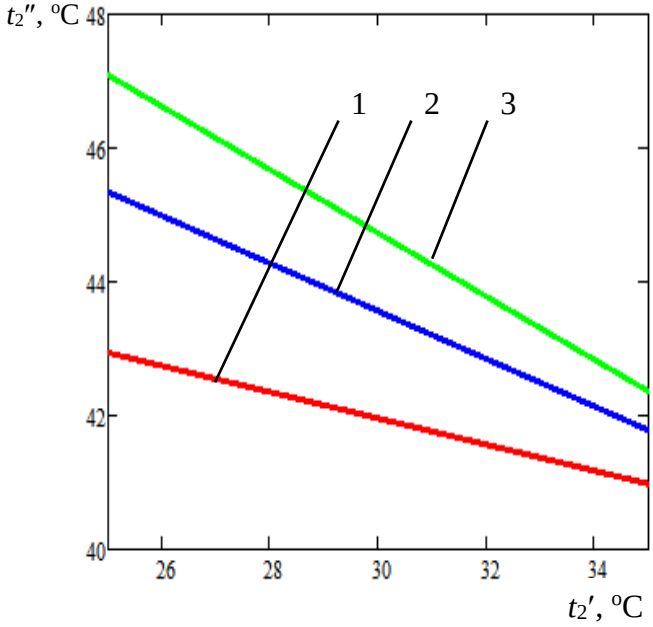

Рис. 1 – Зависимость конечной температуры охлаждаемой воды в конденсаторе от начальной температуры воды при массовом расходе:
1 – G_2=60000 кг/час;
2 – G_2=30000 кг/час; 3 – G_2=15000 кг/час

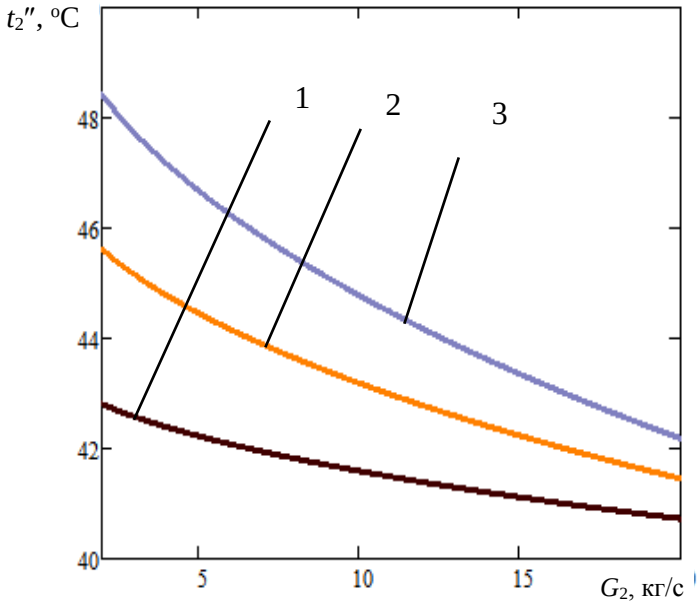

Рис. 2 – Зависимость конечной температуры охлаждаемой воды в конденсаторе от массового расхода при начальной температуре воды:
1 – t_2'=35 °C; 2 – t_2'=30 °C; 3 – t_2'= 25 °C

Анализ представленных расчетных данных позволяет отметить как ожидаемую закономерность: уменьшение расхода воды при прочих равных

условиях приводит к увеличению ее температуры на выходе из аппарата; так и не совсем очевидную: увеличение температуры воды на входе при прочих равных условиях приводит к некоторому снижению температуры воды на выходе. Объяснение второй закономерности заключается в том, что в этом случае происходит уменьшение среднего температурного перепада в аппарате, и вода отводит меньше теплоты, что приводит к снижению производительности аппарата по сконденсированному пару холодильного агента. На рисунке 3 приведена зависимость вышеуказанных параметров.

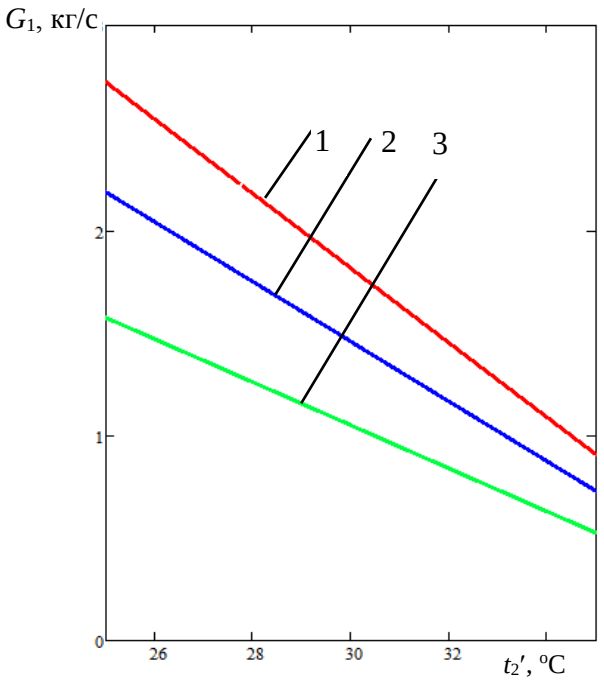

Рис. 3 – Зависимость производительности аппарата по сконденсированному пару рабочего тела от начальной температуры воды при массовом расходе: 1 – G_2=60000 кг/час; 2 – G_2=30000 кг/час; 3 – G_2=15000 кг/час

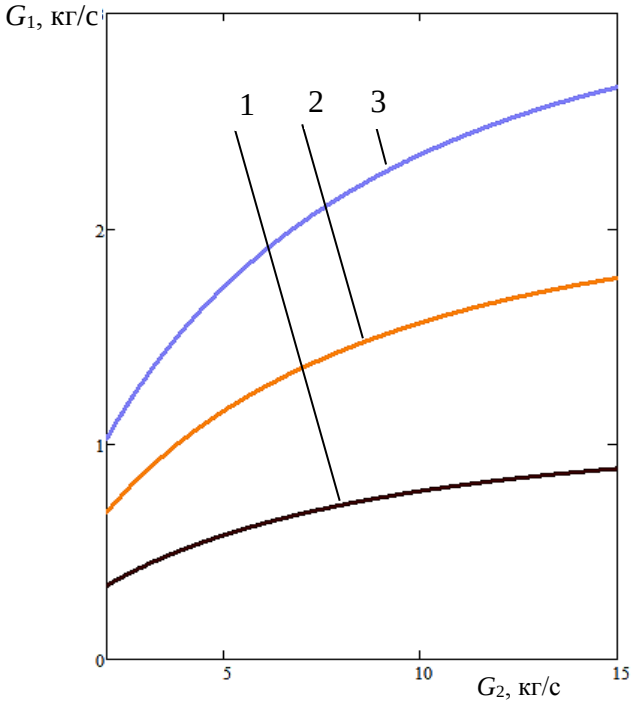

Рис. 4 – Зависимость производительности аппарата по сконденсированному пару рабочего тела от массового расхода при начальной температуре воды: 1 – t_2'=35 °C; 2 – t_2'=30 °C; 3 – t_2'= 25 °C

В целом с повышением G_2 и снижением значения начальной температуры воды t_2' производительность аппарата по сконденсированному пару G_1 повышается. При фиксированном расходе G_2 снижение t_2' на 5°C приводит к увеличению G_1 более, чем в 2 раза (рисунок 4).

Таким образом, на широко применяемом в холодильной отрасли примере теплообменного аппарата показано, как при помощи разработанного научно-обоснованного инструментария разрабатывается цифровой двойник любого типа конденсатора холодильной машины, охлаждаемого оборотной водой. С его помощью можно определять реальные количественные характеристики работы

соответствующих аппаратов в зависимости от расхода охлаждающей воды и ее входной температуры. Наличие такой информации позволяет осознанно управлять работой теплотехнологического оборудования при отклонении параметров работы градирни от номинальных.

В третьем разделе работы «**Обоснование теории тепломассообменных процессов в водоохлаждающих устройствах с подвижными насадками**» и экспериментально рассмотрена специфика контактирующих потоков и состояние псевдоожиженного слоя в водоохлаждающих аппаратах с подвижной насадкой.

Выведены расчетные зависимости, позволяющие определить основные параметры структурных характеристик контактирующих сред. Получены и проанализированы экспериментальные данные в области гидродинамики и тепломассообмена для новых типов насадочных устройств при испарительном охлаждении воды. Эти данные необходимы для разработки методик расчета вентиляторных градирен с подвижной насадкой на заданную производственную мощность.

Важной величиной, определяющей эффективность аппаратов с подвижной насадкой, является значение поверхности контакта фаз (ПКФ). Состояние псевдоожиженного слоя определяется между фазным взаимодействием жидкостных пленок на поверхности элементов, струи и капель с газовым потоком, а также взаимодействием элементов насадки друг с другом, пленками, струями и каплями. Жидкость, находящаяся на поверхности элементов в виде пленок, перетекает из элемента в элемент в виде струй. Разрушение пленок и струй может произойти с образованием капли под влиянием газового потока и элементов насадки.

При моделировании процесса формирования псевдоожиженного слоя и тепломассопереноса в аппаратах с подвижной насыпной насадкой получены выражения для определения расхода жидкости в пленке смоченной поверхности насадки (3), критической скорости газа, при которой начинается интенсивный вынос капель (4), величины капельного уноса из псевдоожиженного слоя (5):

$$G_{\alpha} = \frac{1}{3\nu_{ж}}\left(g\,sin\,\alpha - \frac{2}{\rho_{ж} d_{эн}} \cdot \frac{\partial p}{\partial \alpha}\right)\delta_{\alpha}^{2} - \frac{\tau_{\alpha}\delta_{\alpha}^{2}}{2\nu_{ж}\rho_{ж}}, \qquad (3)$$

где $\nu_{ж}$ – кинематический коэффициент вязкости жидкости, м^2/с; g – ускорение свободного падения, м/с^2; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м^3; $d_{эн}$ – диаметр элемента насадки, м; δ_{α} – толщина пленки на поверхности насадки при угле α, м; p – статическое давление, Па; τ – касательные напряжения; α – угол стекания пленки жидкости (в пределах от 0 до π).

$$\omega_{г}^{к.у.} = 582\left(\frac{\rho_{ж} g}{\rho_{г}\nu_{г}^{0,5}}\right)^{2/3} \cdot \sigma \frac{\bar{\delta}_{ж}\left(1-\varepsilon_{д}\right)^{2}}{\rho_{эн} d_{эн}^{3} \nu_{с}^{2}} \varphi\ , \qquad (4)$$

где $\omega_г^{к.у.}$ – критическая скорость газа, при которой начинается интенсивный вынос капель, м/с; φ – газосодержание, м^3/м^3; $\rho_г$ – плотность газа, кг/м^3; $\nu_г$ – кинематический коэффициент вязкости газа, м^2/с; σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; $\bar{\delta}_ж$ – средняя по поверхности толщина пленки, м; $\varepsilon_д$ – порозность динамического слоя; g – ускорение свободного падения, м/с^2; $\nu_с$ – кинематический коэффициент вязкости псевдоожиженного слоя, м^2/с; $\rho_{эн}$ – насыпная плотность элементов насадки, кг/м^3.

$$G^{к.у.} = 2G_ж\varepsilon_д\left\{1 - e^{-0,7\left(\frac{d_{вит}}{d_{кап}}\right)^3}\right\}, \qquad (5)$$

где $G^{к.у.}$ – величина капельного уноса из псевдоожиженного слоя, м^3/с; $G_ж$ – расход жидкости, м^3/с; $d_{кап}$ – диаметр формируемых капель в слое, м; $d_{вит}$ – диаметра витания капель в слое, м.

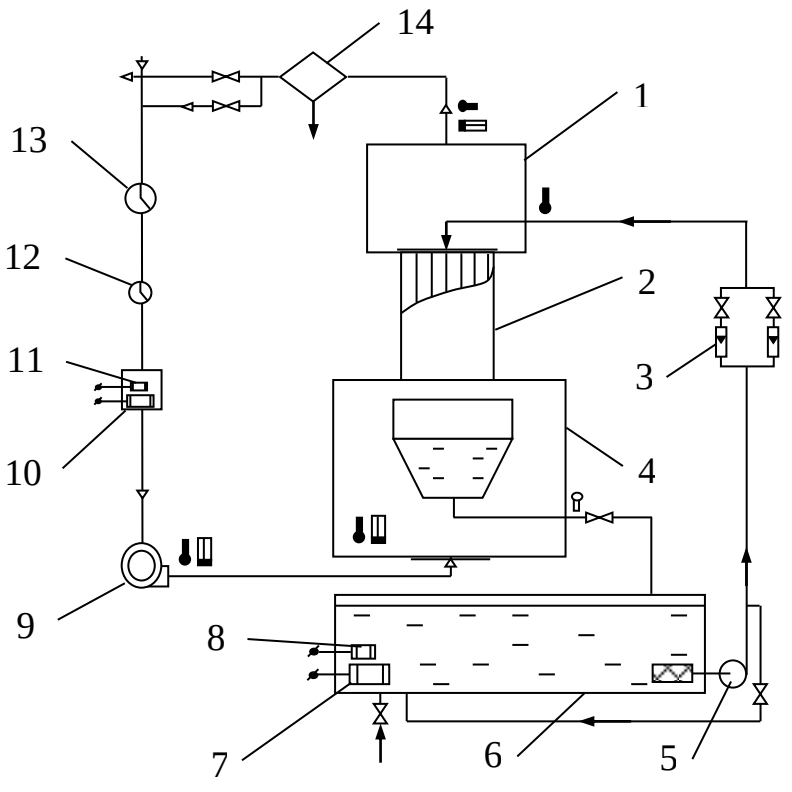

Рис. 5 – Экспериментальный стенд: 1, 2, 4 - верхняя, рабочая и нижняя камеры; 3 - блок ротаметров; 5 - насос; 6 - водяной бак; 7 - водяные ТЭНы; 8 - ТЭН регулятора $t_ж$; 9 - вентилятор; 10 - воздушные ТЭНы; 11 - ТЭН вентилятора $t_г$; 12 - калориметрический расходомер; 13 - расходомер коллекторного типа; 14 - сепаратор капельной влаги

Полезность зависимостей (3)-(5) заключается в оценке влияния состояния псевдоожиженного слоя на тепломассообмен при охлаждении жидкости в аппаратах с подвижной насадкой, позволяющей при ограниченной эмпирической информации о состоянии псевдоожиженного слоя прогнозировать значение структурных характеристик – количество удерживаемой жидкости, величину поверхности контакта фаз, капельный вынос при изменении конструктивных ($\rho_{эн}$, $d_{эн}$) и режимных ($\omega_г$, $q_ж$) параметров.

Для исследования гидродинамики насадочных устройств и тепломассообмена в условиях противоточного движения воздушно-водяного потоков была использована экспериментальная установка (рисунок 5), которая

обеспечивает визуальное наблюдение развития гидроаэродинамических режимов движения воды и воздуха через насадку, а также позволяет определить удерживающую способность, гидравлическое сопротивление, глубину охлаждения воды и коэффициенты интенсивности тепло- и массообмена.

Стенд состоят из головной части и систем подготовки потока. Пропускная способность – до 1200 м^3/ч газа. В рабочей части размещен капельно-пленочный оросиитель; в верхней – водораспределитель трубчатого типа; в нижней – многосекционный водосборник. В камерах установлены отборники статического давления. Замер значений температуры потоков организован в нижней камере и на выходе из сепаратора – в теплоизолированном диффузоре.

Диапазон изменения параметров: $d_{эн}$ = 0,037…0,040 м; $\omega_г$ = 0…6 м/с – противотока; $t_ж$ = 25 ºС…40 ºС. (т.к. температура поступающей воды на охлаждение в градирню не должна превышать 65 ºС).

Погрешность измерения основных величин, обусловленная точностью измерений, вычислялась при обработке данных для каждого опыта и составляет: точность сведения теплового баланса – от 3 до 12 %; Δp = 0,2...3 %; ξ = 2...7 %; N_Σ = 6...8 %; основных кинетических характеристик – 8...12 %. Корректный способ представления результатов измерений состоял в том, чтобы указать наилучшую оценку измеряемой величины. Для этого проводили несколько (n) однородных экспериментов. Оценка истинного значения измеряемой величины определялась как средняя арифметическая. Для всех экспериментальных исследований, представленных в данном разделе, проводилось не менее трех измерений.

Геометрические характеристики изучаемых элементов насадки (ЭН) приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Геометрические характеристики элементов подвижной насадки

№	Материал насадки	Геометрия	$\rho_{эн}$, кг/м^3
		$d_{эн}$, мм	
1	Вспененный полипропилен	40,1	248
2		40,3	305
3	Пустой целлулоидный шар, частично заполненный водой	37,1	100...1000 с шагом в 100 единиц

С научной и практической точек зрения важными представляется вопросы о характере перехода насадочного слоя из стационарного к подвижному состоянию и анализ состояния псевдоожиженного слоя в аппаратах с подвижной насыпной насадкой, вывод формулы, позволяющей определить основные параметры структурных характеристик контактирующих сред.

На рисунке 6 показаны полученные кривые псевдоожижения и виброкривая L_a ($\omega_г$, $q_ж$) при следующих условиях: высота насадочного слоя $H_{ст}$ = 0,1 м, $d_{эн}$ = 0,04 м, $\rho_{эн}$ = 300 кг/м^3, плотность орошения $q_ж$ = 15 м^3/(м^{2}ч).

Стационарному состоянию слоя соответствует практически неизменный уровень виброускорения ($L_a = 5{,}5\omega_г^{0{,}08}$). Процесс перехода ЭН к подвижному состоянию оказался значительно сложнее традиционного представления. При $\omega_г = \omega_0'$ образуются неустойчивые псевдостационарные состояния ЭН, наблюдаемые при неизменных нагрузках, периодическим движением отдельных ЭН (перестройка слоя с изменением различия). Их продолжительность колеблется от десятков секунд до нескольких минут.

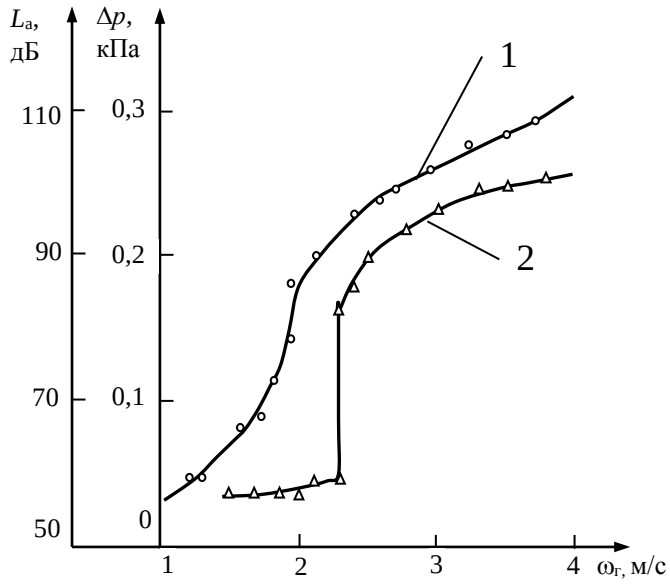

Рис. 6 – Экспериментальные зависимости: 1 – кривая псевдоожижения $\Delta p = f(\omega_г)$; 2 – виброкривая $L_a = f(\omega_г)$.

Изменяется структура слоя и колеблется задержка жидкости в нем, т.е. значение ω_0 характеризуется некоторым диапазоном существования.

Ширина этого диапазона зависит от степени первоначальной уплотнения слоя, определяемого собственным весом ЭН и действием внешних нагрузок и вибраций. Например, для ЭН при $\rho_{эн} = 300$ кг/м^3 и $d_{эн} = 0{,}037$ м эта величина составляет 0,4 м/с.

Установлено, что элементы при $\rho_{эн} < 200$ кг/м^3 переходят в подвижное состояние, минуя захлебывание в стационарном состоянии; при $\rho_{эн} > 200$ кг/м^3 псевдоожижение осуществляется в условиях захлебывания расширяющегося псевдостационарного слоя; при $\rho_{эн} > 700$ кг/м^3 эта картина сохраняется при больших значениях $H_ж$, причем часть жидкости выносится за пределы слоя и располагается поверх его верхнего предела в виде слоя пены толщиной $H_п > 0{,}02$ м.

На основе анализа полученных зависимостей влияния нагрузок по воде и газу на удерживающую способность слоя подвижной насадки при $H_{ст}$=0,1 м сделан вывод о том, что предпочтительным для реализации массообменных процессов представляется диапазон $\rho_{эн} = 200\ldots700$ кг/м^3, отличающийся широким рабочим участком скорости $\omega_г$, приемлемыми значениями уноса жидкости $\Delta G_ж$ и сравнительно небольшой динамической высотой слоя $H_д$.

Важнейшими гидродинамическими характеристиками градирен с подвижной насыпной насадкой, необходимыми для инженерного расчета, являются критические скорости (ω_0', ω_1), расход напора в рабочей зоне (Δp), задержка жидкости ($H_ж$) и динамическая высота слоя ($H_д$). Эта информация позволяет выбрать рабочий режим тепломассообменного аппарата (ТМА), рассчитать высоту колонны и мощность вентилятора.

С учетом влияния $q_ж$ и $\rho_{эн}$ получены следующие зависимости:

$$\omega_0' = \frac{4320 \cdot \rho_{эн}^{-1,21} \cdot \omega_0}{4320\rho_{эн}^{-1,21} + q_ж^{(-1,25 \cdot 10^{-4} \rho_{эн} + 0,275)}} \quad . \qquad (6)$$

Это уравнение справедливо при 200≤ $\rho_{эн}$ ≤1000 кг/м^3 и 5≤ $q_ж$ ≤25 м^3/(м^{2}ч).

Значение ω_1 характеризует переход к развитому псевдоожижению, т.е. к однородно псевдоосжиженному слою:

$$\omega_1 = 1{,}4 \cdot \omega_0'. \qquad (7)$$

Динамическая высота слоя:

$$H_д = H_{ст} + H_{ст}\left(\omega_Г - \omega_0'\right)\left[16{,}2e^{-0{,}002\rho_{эн} - 70d_{эн}} + 0{,}007q_ж\right]. \qquad (8)$$

При $\omega_г = \omega_0'$ величина $H_д = H_{ст}$. Формула (8) справедлива при $q_ж \le 25$ м^3/(м^{2}ч); $H_{ст}$ = 0,5...0,2 м; $\rho_{эн}$ = 90…1000 кг/м^3; $d_{эн}$ = 0,035…0,042 м.

Таким образом, в результате выполнения исследований установлены новые закономерности протекания тепломассообменных процессов в водоохлаждающих устройствах с подвижной насадкой и разработаны практические основы для определения конструктивных и технологических параметров проектируемых устройств.

В четвертом разделе «**Синтез систем использования теплоты оборотной воды без повышения ее температурного уровня**» проанализированы возможности использования теплоты воды в цикле оборотного водоснабжения без повышения ее температурного уровня для теплоснабжения и предложены конкретные схемные решения.

На ППП температура оборотной воды, направляемой на охлаждение, обычно составляет 30-45 °С. Этот температурный уровень существенно ниже тех значений, которые традиционно используются для теплоснабжения (отопление, горячее водоснабжение и вентиляция), однако даже такой температурный потенциал предложено использовать для выполнения задач теплоснабжения с целью экономии энергетических ресурсов.

В работе предложены схемные решения для отопления, системы «теплый пол» (рисунок 7), систем предварительного подогрева воды в системах горячего водоснабжения (рисунок 8), для системы вентиляции воздуха типа «чиллер-фанкойл» (рисунок 9).

Согласно Своду Правил 30.13330.2016 расчетное значение температуры горячей воды независимо от применяемой системы теплоснабжения должна быть не ниже 60 °С и не выше 65 °С. Температурный уровень оборотной воды, направляемой на охлаждение, не позволяет нагревать водопроводную воду до заданной температуры.

Однако, учитывая, что температура исходной водопроводной воды в течение года меняется в пределах 5…15 °С, при помощи оборотной воды можно провести предварительный подогрев водопроводной воды.

Подобная техническая задача решается при реализации двухступенчатого подогрева воды в тепловых пунктах зданий, присоединенных к системе централизованного теплоснабжения. В этом случае предварительный подогрев водопроводной воды производится за счет использования теплоты обратной воды, идущей от теплоиспользующих установок в обратную магистраль. При этом решаются две задачи:

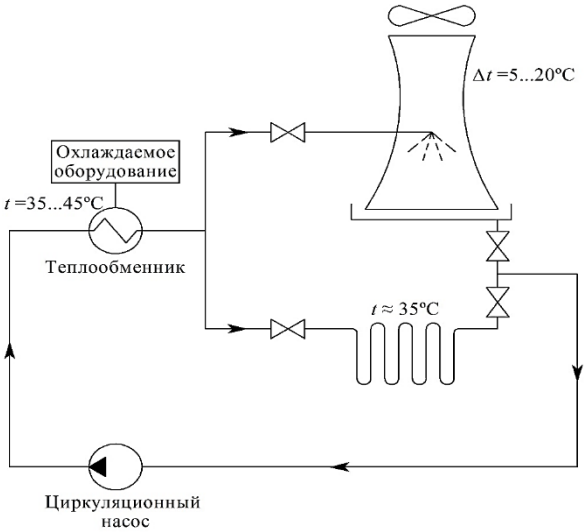

Рис. 7 – Схема подключения системы «теплый пол» к системе оборотного водоснабжения

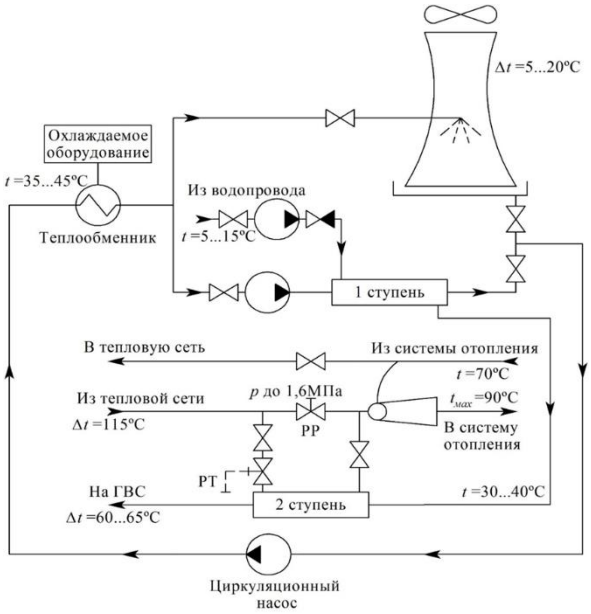

Рис. 8 – Схема подключения системы горячего водоснабжения к системе оборотного водоснабжения

− во-первых, снижается расход сетевой воды, что способствует увеличению пропускной способности трубопроводов тепловой сети и снижению потребляемой сетевыми насосами электрической мощности;

− во-вторых, снижается температура воды в обратном трубопроводе, что уменьшает потери теплоты в наружных сетях, а при теплоснабжении от ТЭЦ способствует дополнительной выработке электрической энергии по теплофикационному циклу.

В предлагаемой схеме в теплообменнике первой ступени нагрев водопроводной воды будет производиться за счет использования теплоты оборотной воды, остальная часть схемы остается без изменений (рисунок 8). В нем холодная вода с температурой +5 °С подогревается до 30…40 °С. Затем подогретая вода подается во вторую ступень и догревается до требуемой температуры, обычно 60 °С, горячим теплоносителем. Вторая ступень включается параллельно или последовательно системе отопления в зависимости от схемы.

Расход сетевой воды на ГВС – величина переменная. Постоянная температура горячей воды на выходе из подогревателя поддерживается регулятором температуры РТ в зависимости от ее расхода.

Поскольку температура охлаждаемой оборотной воды выше заданной температуры воздуха, очевидно, что с ее помощью задача подогрева вентиляционного воздуха может быть также решена.

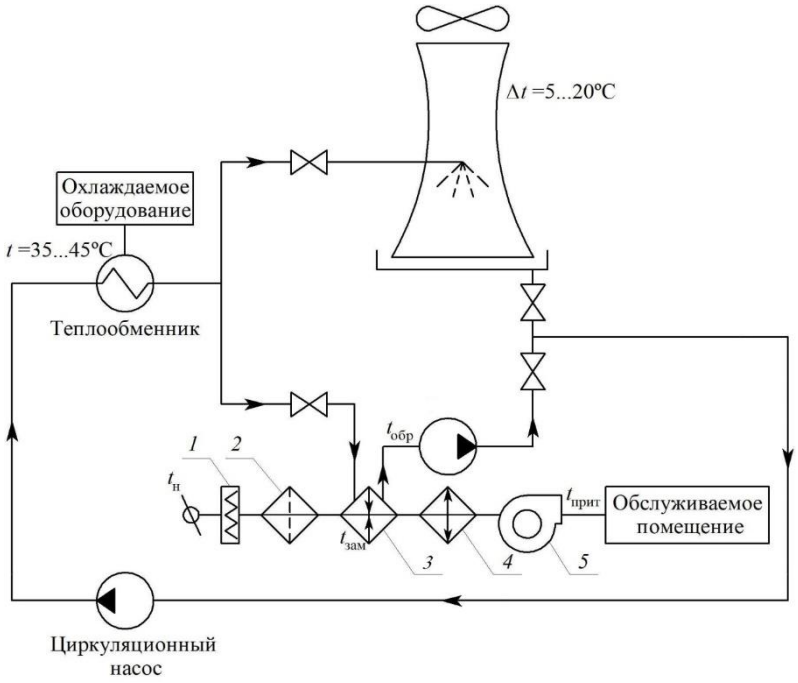

Рис. 9 – Схема подключения калорифера центрального кондиционера к системе оборотного водоснабжения: 1 – направляющие решетки; 2 – фильтр; 3 – водяной калорифер; 4 – охладитель; 5 – вентилятор

Однако ввиду того, что температура охлаждаемой оборотной воды существенно ниже традиционно принятой температуры греющего теплоносителя, направляемого в калорифер, решение задачи по предложенному пути приведет к существенному увеличение требуемой поверхности теплообмена калорифера.

Схема подключения калорифера центрального кондиционера к системе оборотного водоснабжения показана на рисунке 9.

Идея использования теплоты оборотной воды в калорифере центрального кондиционера может быть сфокусирована и на фанкойл, работающий в режиме обогрева.

В пятом разделе «**Моделирование систем использования теплоты оборотной воды на базе парокомпрессионных теплонасосных установок**» рассмотрены теоретические и действительные циклы ПТНУ, работающих на хладагентах четвертого поколения и использующих оборотную воду ППП как низкопотенциальный источник; развит научно-методологический подход для расчета и прогнозирования работы ПТНУ на основе современных эколого-энергетических показателей. На основе эксергетического анализа показано, что повышение термодинамической, энергетической и эколого-экономической эффективности ПТНУ возможно за счет рационализации этих связей.

Обосновано, что первостепенное условие высокоэффективной работы низкотемпературных технологий преобразования энергии – это выбор «правильного» рабочего тела, что представляется сложной комплексной задачей, поскольку это всегда некое компромиссное решение между достаточно противоречивыми требованиями. Необходимо учитывать аспекты глобального и локального, прямого и косвенного влияния хладагента на окружающую среду.

В ходе пассивного эксперимента применен научно-методологический подход для расчета и прогнозирования работы энергопреобразующей системы –

ПТНУ типа «вода-вода» с одноступенчатым сжатием (рисунок 10) – на основе энтропийно-циклового и эксергетического анализов. Использованы природные хладагенты и хладагенты четвертого поколения по классификации ASHRAE, а именно: R600a, R744, R1234ze и R1336mzz (E).

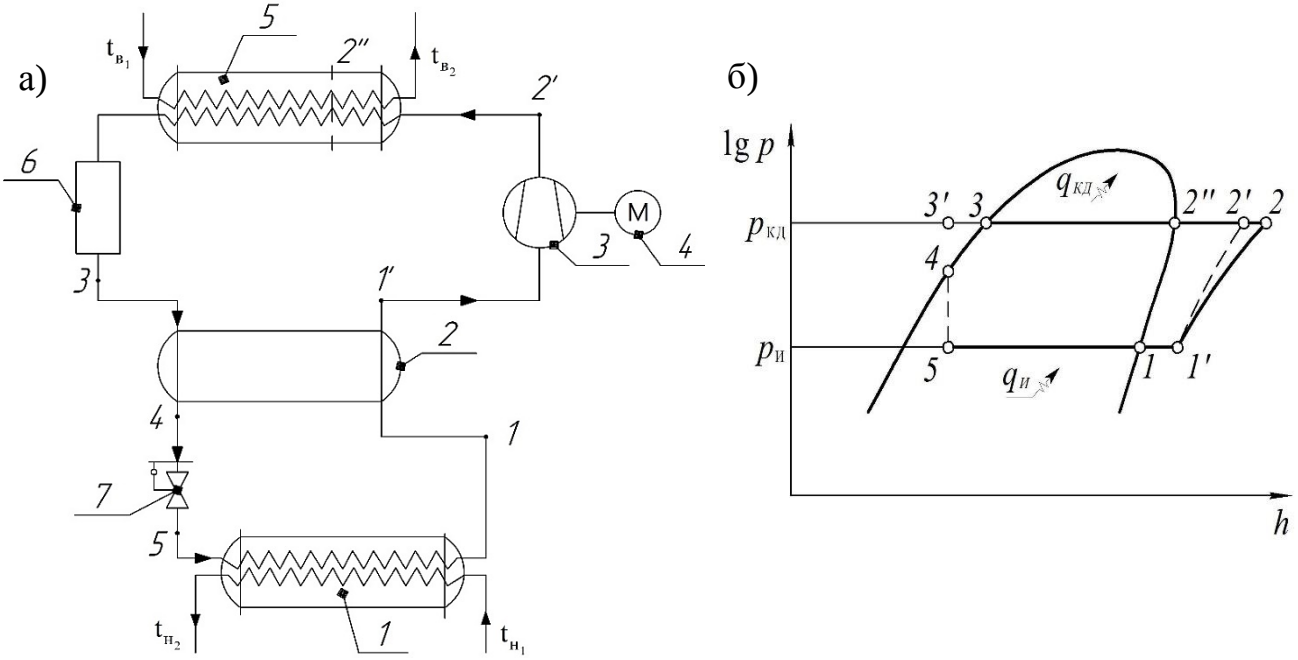

Рис. 10 – Принципиальная схема парокомпрессионного теплового насоса типа «вода-вода» (а) и термодинамический цикл в фазовой диаграмме (б): 1 – испаритель; 2 – регенеративный теплообменник, 3 – компрессор, 4 – электромотор; 5 – конденсатор; 6 – ресивер; 7 – дросселирующее устройство

Были приняты следующие исходные данные и ряд допущений: температура источника низкопотенциальной теплоты – оборотной воды ППП – $T_{н1}$ = 293…313 К, при $\Delta T_И$ = 10 К; значение температуры конденсации $T_{КД}$ = 333 К; разность температур на выходе из конденсатора $\Delta T_{КД}$= 5 К; тепловая нагрузка на конденсатор $Q_{КД}$ = 450 кВт; во всех элементах ПТНУ сохраняется стационарное состояние; потери давления в трубопроводах пренебрежительно малы; теплота передается только путем теплопередачи от низкопотенциального источника к хладагенту (в испарителе) и от хладагента высокопотенциальному источнику (в конденсаторе); не учитываются потери кинетической и потенциальной энергии потока; в теоретических циклах осуществляется адиабатное сжатие хладагента в компрессоре и изоэнтальпное расширение в дросселирующем устройстве; изоэнтропный КПД компрессора составляет 85 % (для теоретического цикла); механический КПД компрессора и электрический КПД двигателя компрессора составляют 85 % и 90 % соответственно (для реального цикла); параметры окружающей среды – средняя температура НПИ T_0=303 К при p_0 = 0,1 МПа.

Особое внимание было уделено анализу работы ПТНУ на R744 (диоксиде углерода), когда рабочий цикл попадает в надкритическую область (транскритический режим), что усложняет анализ процесса отвода теплоты ВПИ.

В компоновочные схемы ПТНУ на R744 введен регенеративный теплообменник, основная задача которого заключается в увеличении степени переохлаждения на выходе из газоохладителя за счет внутрицикловой регенерации, что влечет за собой увеличение холодопроизводительности. Замена регулирующего клапана турбиной является единственным доступным вариантом для улучшения производительности системы и уменьшения необратимости процесса расширения (до 18 %).

Для прогнозирования оптимального давления отвода теплоты (давления нагнетания) и построения транскритического цикла была использована зависимость:

$$p_{\text{опт}} = 4{,}9 + 2{,}25t_{\text{КД}} - 0{,}17t_{\text{И}} + 0{,}002t_{\text{КД}}^2 = 14{,}4 \text{ МПа}. \quad (9)$$

Что касается рисков для безопасности во время работы при высоком давлении, то новейшие производственные технологии могут обеспечивать эти характеристики в соответствии с требованиями стандартов качества и безопасности. Потенциальные преимущества работы при высоком давлении заключаются в том, что повышенная плотность паров позволяет использовать более компактные системы.

Эксергетический метод, основанный на первом и втором законах термодинамики, позволяет выполнить как относительную (эксергетический КПД), так и абсолютную оценку степени термодинамического совершенства системы. При анализе была учтена затраченная эксергия и получаемый при этом эксергетический КПД. Задача состояла в том, чтобы подведенная эксергия в анализируемую систему была минимальной и реализовывалась с максимально возможным эксергетическим КПД.

Эксергия теплового потока является работой, получаемой в цикле Карно, если приемник теплоты – среда с неограниченной теплоемкостью. Определение эффективности тепловых циклов на основе эксергии, а не работы, позволяет сравнивать установки, работающие в разных условиях окружающей среды.

Значение удельной эксергии хладагента в характерных точках процесса:

$$e_i = (h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0), \quad (10)$$

где h_0, s_0 – энтальпия и энтропия хладагента при параметрах окружающей среды T_0=303К, p_0 = 0,1МПа.

Уравнение эксергетического баланса через удельные величины для ПТНУ:

$$\sum d_i = \sum e_{\text{вх}} - (\sum e_{\text{вых}} + \Delta e), \quad (11)$$

где $\sum d_i$ – сумма потерь эксергии, кДж/кг; $\sum e_{\text{вх}}$ и $\sum e_{\text{вых}}$ – суммы входящих и выходящих потоков эксергии, соответственно, кДж/кг; Δe – приращение эксергии системы между начальной и конечной точками процесса, кДж/кг.

Эксергетический КПД η_e характеризует степень необратимости реальных процессов и циклов, протекающих в энергопреобразующих системах:

$$\eta_e = \frac{\sum e_{\text{вых}}}{\sum e_{\text{вх}}} = \frac{\sum e_{\text{вх}} - \sum d_i}{\sum e_{\text{вх}}} = 1 - \frac{\sum d_i}{\sum e_{\text{вх}}}. \quad (12)$$

Для обратимых процессов потери эксергии $\Sigma d = 0$ и эксергетический КПД $\eta_e = 1$, для необратимых $\Sigma d > 0$ и $\eta_e < 1$. Таким образом, потери эксергии характеризуют необратимость происходящих в системе процессов.

Были учтены такие показатели, характеризующим работу ПТНУ, как:

экологический коэффициент преобразования (теплотрансформации), позволяющий выполнить оценку экологического воздействия установки на окружающую среду:

$$ECOP = \frac{q_{\text{ТН}}}{\sum d_i}, \quad (13)$$

где $q_{\text{ТН}}$ – удельная теплопроизводительность ПТНУ, кДж/кг;

индекс эксергетической устойчивости:

$$\text{ИЭУ} = \frac{1}{\eta_e} - 1. \quad (14)$$

Для оценки работы ПТНУ типа «вода-вода», работающей на современных хладагентах, использовано программное обеспечение: REFPROF ver.9.0, MS Excel, CoolPack 1.49. Для каждого хладагента были построены теоретические и действительные циклы в диаграммах состояния $\lg p$-h и выполнены полные термодинамический и эксергетический анализы. Основные термодинамические показатели, характеризующие работу ПТНУ типа «вода-вода», приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Термодинамические характеристики действительного цикла ПТНУ типа «вода-вода» при $t_{\text{И}}$ = 20 °С и $t_{\text{КД}}$=60 °С

Хладагент/ показатель	R1234ze	R1336mzz (E)	R600a	R744
$\mu_{\text{тн}}$	4,72	3,67	4,85	3,1
$COP_{\text{КАРНО}}$	8,33	8,33	8,33	7,53 ($COP_{\text{Лоренца}}$)
$\gamma_{\text{дейст}}$	0,57	0,44	0,58	0,41
η_e	0,34	0,26	0,35	0,3
$ECOP_{\text{дейст}}$	7,3	5,14	7,61	4,57
$ИЭУ_{\text{дейст}}$	1,96	2,78	1,88	2,37

Для хладагентов R1234ze и R600a значения $\mu_{\text{тн}}$ имеют незначительную разницу – на 2,7%, и степень термодинамического совершенства $\gamma_{\text{дейст}}$ одинаковая – 0,57; наименьшее значение $\mu_{\text{тн}}$ и $ECOP_{\text{дейст}}$ получено для R744. Наибольшие значения $ECOP$ у циклов на R1234ze и R600a: ожидаемый эффект ПТНУ почти в 7,5 раз превышает эксергетические потери. Поэтому для заданных исходных данных для ПТНУ в качестве рабочего тела целесообразно рассматривать R600a и R1234ze.

В мировой практике в процессе выбора хладагента в основном используются три экологических показателя: потенциал глобального потепления – ПГП (англ. *Global Warming Potential - GWP*), Полный эквивалентный вклад в парниковый эффект (англ. *Total Equivalent Warming Impact - TEWI*), влияние на климат за жизненный цикл (англ. *Life Cycle Climate Performance – LCCP*).

Хотя каждый из показателей служит одной и той же цели – количественной оценки воздействия хладагентов на глобальное потепление, их использование может привести к разным выводам. Поэтому для корректного проектирования, эксплуатации и прогнозирования работы парокомпрессионных энергопреобразующих систем неотъемлемым этапом должна быть оценка их влияния на климат за весь срок эксплуатации.

Для проведения сравнительной оценки экологических показателей работы ПТНУ типа «вода-вода» на разных хладагентах в качестве эталонного хладагента принят R410A, как один из наиболее применяемых на данный момент хладагентов в парокомпрессионных системах. Расчетные значения экологических показателей приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Расчетные значения экологических показателей ПТНУ типа «вода-вода» $t_И$ = 20 °С и $t_{КД}$=60 °С

Хладагент/ показатель	R1234ze	R1336mzz (E)	R600a	R744	R410a
GWP	7	18	3	1	2000
% от R410a	0,35	0,9	0,15	0,05	100%
TEWI, кг$CO_{2экв}$	16,33	36,33	8,58	10,43	43,3
% от R410a	37,7	83,9	20,0	24,09	100%
LCCP, кг$CO_{2экв}$	16,58	36,52	8,64	10,68	45,4
% от R410a	36,2	80,4	19,0	23,52	100%
% от *TEWI*	+1,51	+0,52	+0,7	+2,4	+4,84

Исходя из полученных результатов, наиболее экологически чистым хладагентом с наименьшим *GWP* является R600a со значением суммарной эмиссии эквивалентного CO_2 за весь период жизненного цикла (15 лет) в 8,64 кг$_{CO2}$. Непосредственный вклад в *TEWI* вносит величина коэффициента преобразования ПТНУ $\mu_{тн}$. Так, при использовании хладагента, требующего на 3% больше электроэнергии на привод оборудования ПТНУ или ХМ, показатель *TEWI* будет почти в 3 раза выше. Так, несмотря на то, что $GWP_{R600a} > GWP_{R744}$ в 3 раза, энергопотребление ПТНУ на R744 на 35,26 % больше, чем для ПТНУ на R600a, а значит и удельные косвенные выбросы больше, что подтверждается расчетами.

Из рассматриваемых альтернативных хладагентов наихудшие экологические показатели у R1336mzz (E), т.к. суммарная эмиссия эквивалентного CO_2 за весь период жизненного цикла превышает аналогичный показатель для R600a в 4,2 раза.

Результаты *LCCP* показывают, что производительность системы и выбросы при производстве оборудования являются доминирующими факторами выбросов CO_2 в течение всего срока службы ПТНУ. Результаты сравнения хладагентов на основе *TEWI* и *LCCP* прямопропорционально зависят от величины потребляемой энергии со стороны ПКТУ, что также отражается на КПД системы.

Определена зависимость энергетической эффективности работы ПТНУ, которая выражена основными показателями (коэффициент теплотрансформации ($\mu_{ТН}$), *ECOP*, эксергетический КПД (η_e), степень термодинамического совершенства ($\gamma_{дейст}$)), от температуры кипения хладагента. При повышении температуры кипения на каждые 5 градусов повышение $\mu_{тн}$ составило: для R600a – 13…29 %; для R1234ze – 11…36 %; R1336mzz – 8…34 %; R744 – 7…22 % (рисунок 11).

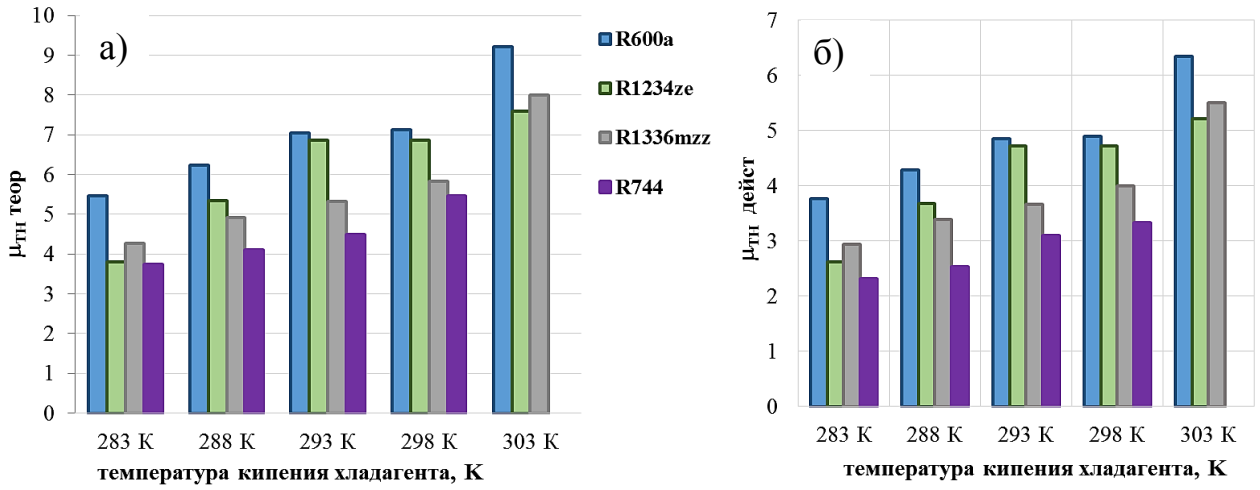

Рис. 11 – Зависимость $\mu_{ТН} = f(t_И)$ для теоретического (а) и действительного (б) циклов

Наибольшее абсолютное значение коэффициента теплотрасформации зафиксировано для R600a, а наименьшие абсолютные значения для каждой температуры кипения для R744. Усредненные значения $\mu_{тн.теор}/\mu_{тн.дейст}$ для каждого исследуемого рабочего тела составили: для R600a – 7,0/4,82 %; для R1234ze – 6,1 %/4,2 %; R1336mzz – 5,7 %/4,0 %; R744 – 4,46 %/2,8 %. Так же было установлено, что для работы ПТНУ для обеспечения горячего водоснабжения изменение температуры низкопотенциального источника в пределах 20…40 °С не оказывает существенного влияния на величину $q_{ТН}$. Зависимость $\eta_e = f(t_И)$ носит прямопропорциональный характер: с увеличением температуры кипения эксергетический КПД системы повышается для всех исследуемых хладагентов (рисунок 12).

Подобный результат подтверждается в работах зарубежных исследователей для других хладагентов: R1234yf, R1234ze, R245fa и R227ea. В теоретических циклах наиболее высокое значение η_e у R600a и R 744 для каждой температуры кипения. В действительных же циклах наименьшие значения у R1336mzz.

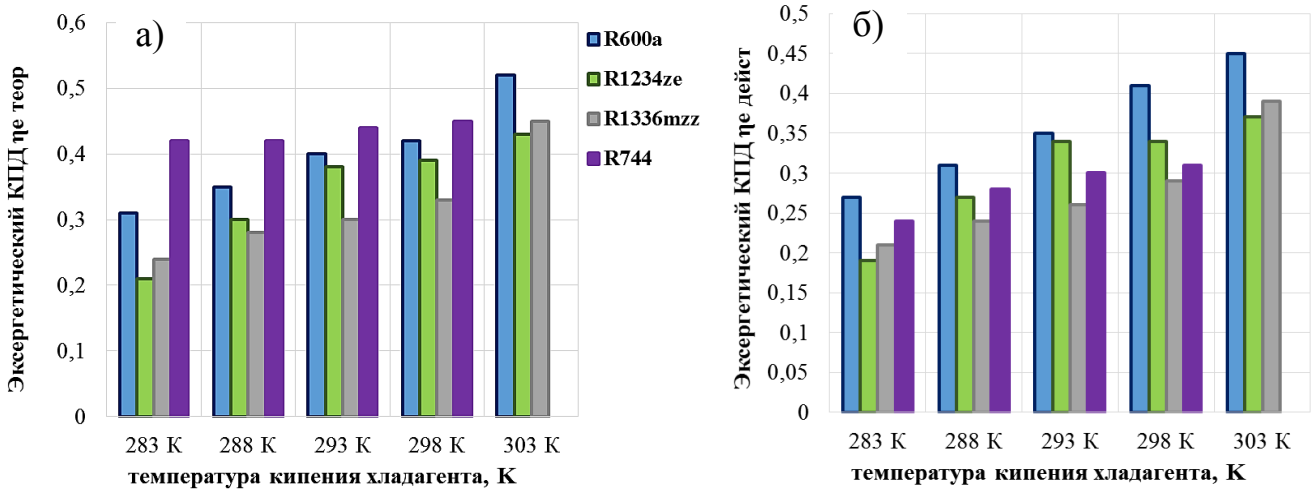

Рис. 12 – Зависимость $\eta_e = f(t_И)$ для теоретического (а) и действительного (б) циклов

Проведенный углубленный эксергетический анализ прикладного значения указывает на местоположение, величину и источники термодинамических необратимостей в энергопреобразующей системе. Распределение потерь эксергии по элементам насоса для исследуемых хладагентов (рисунок 13) позволяет выделить компрессор и конденсатор как элементы с наибольшими потерями.

Первопричиной можно считать неконтролируемый теплообмен от стенок к окружающему воздуху. В теоретических циклах на компрессор и конденсатор приходится в среднем 30 % всех потерь, а в действительном – на 45 % и 22 %, соответственно. Т.е. именно эти узлы необходимо усовершенствовать, чтобы повысить эффективность работы установок. Как для природных хладагентов, так и для хладагентов четвертого поколения наименьший «вклад» в потери эксергии приходится на регенеративный теплообменник (эффективность составила $\eta^e_{РТО}$ = 88…93 % – для теоретических циклов и $\eta^e_{РТО}$ = 90…94 % – для действительных циклов).

Для дальнейшей оценки и выбора «желательного» хладагента для рассматриваемой ПТНУ был использовали метод многокритериальной оптимизации. Для многокритериальных задач локальные критерии обычно имеют разный физический смысл и, следовательно, несопоставимые размерности. Это усложняет решение многокритериальной задачи и приводит к необходимости введения процедуры нормализации критериев или перевод этих критериев в безразмерный вид. При этом обобщенный критерий $D_{х.а.абс.}$ (формулы (15)-(19)) представляет собой сумму всех оценок.

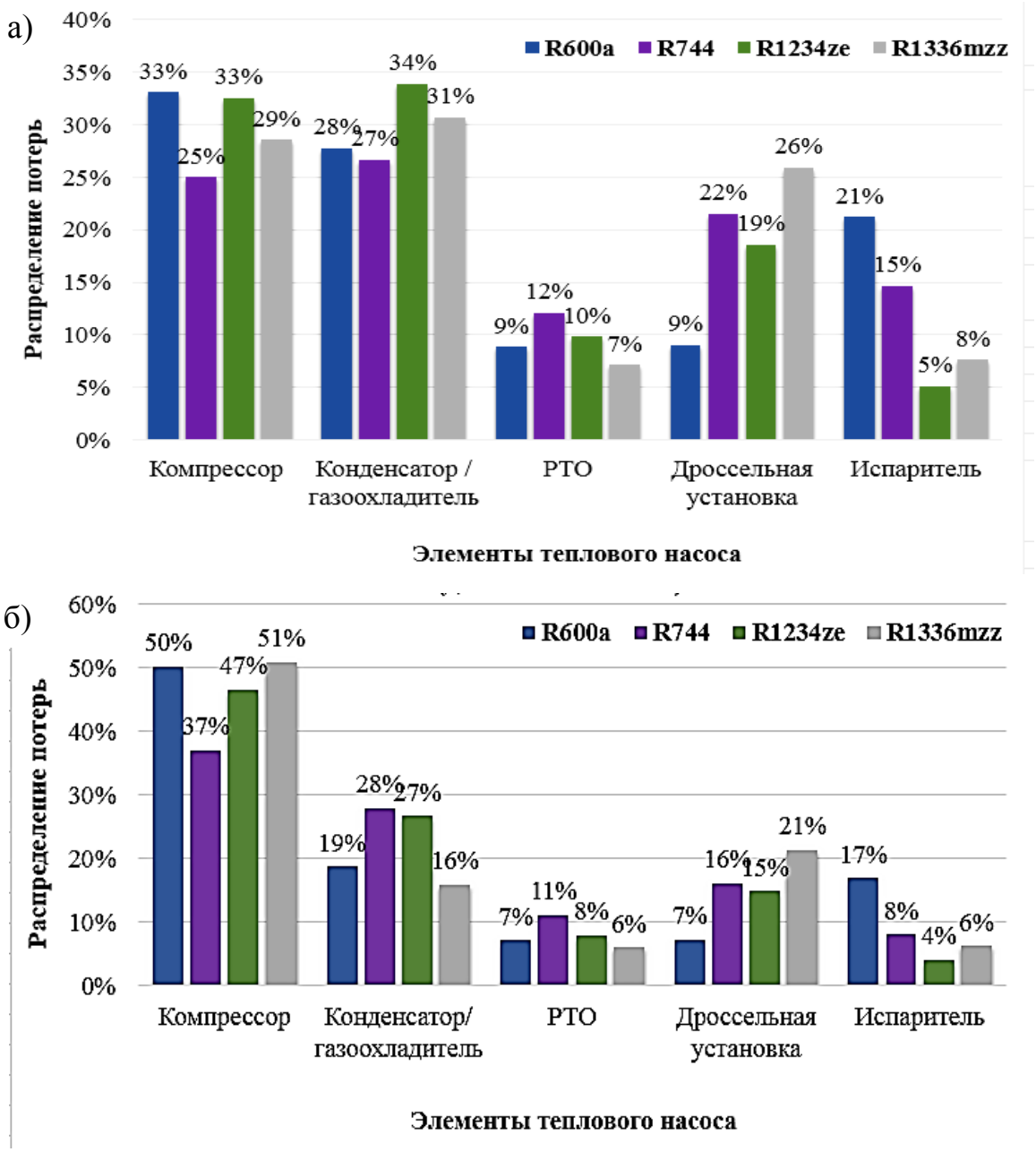

Рис. 13 – Процентное распределение потерь эксергии по элементам ПТНУ: а) теоретический цикл; б) действительный цикл

$$D_i^{\min} = \min D_j(X_j^0) = K_i(X_i^0), \quad i = 1...n; \quad D_i^{\max} = \max D_j(X_j^0), \quad i = 1...n. \qquad (15)$$

$$\mu_{Ki}(X) = \begin{cases} 0, & \text{если } D_i(X) > D_i^{max} \\ \dfrac{D_i^{max} - D_i}{D_i^{max} - D_i^{min}} & \text{если } D_i^{min} < D_i \le D_i^{max}, \\ 1, & \text{если } D_i(X) \le D_i^{min} \end{cases} \qquad (16)$$

Определение абсолютного значения D_{REF}:

$$D^0_{\text{х.а.абс}} = \frac{D_i - D_{min}}{D_{max} - D_{min}}. \quad (17) \qquad D^0_{\text{х.а.абс.}} = \frac{D_{max} - D_i}{D_{max} - D_{min}}. \quad (18)$$

$$D_{\text{х.а.абс.}} = \sum_{i=1}^{n} D^0_{\text{х.а.абс}_i}. \quad (19)$$

Минимальное значение $D_{\text{х.а.абс.}}$ критерия соответствует наилучшему хладагенту среди одновременно расматриваемых рабочих тел. В данной работе было проанализировано девять показателей: термодинамические (теплопроизводительность ПКТУ ($q_{\text{ТН}}$, кДж/кг); действительный эксергетический КПД (η_e); действительная степень термодинамического совершенства ($\gamma_{\text{дейст}}$); действительный коэффициент теплотрансформации ($\mu_{\text{ТН}}$), экологические (*GWP*, кг$CO_{2\text{экв}}$/кг; *TEWI*, кг$CO_{2\text{экв}}$/кг; *LCCP*, кг$CO_{2\text{экв}}$/кг; индекс воспламеняемости;) и экономический, а именно, стоимость 1кг хладагента.

Как видно из рисунка 14, наименьшее значение критерия $D_{\text{х.а.абс.}}$ получены для природного хладагента R600a и синтетического R1234ze. Подход к выбору рабочего тела для низкотемпературных парокомпрессионных установок, основанный на многокритериальной оптимизации, снижает вероятность ошибки при выборе хладагента и является удобным методическим инструментом, который может быть использован для исследования любых низкотемпературных парокомпрессионных систем, независимо от рода рабочей смеси и схемно-цикловых решений Для среднетемпературных ПТНУ R600a и R1234ze являются лучшим выбором, отвечающим всем условия эксплуатации, включая термодинамические свойства, экологические и экономические аспекты.

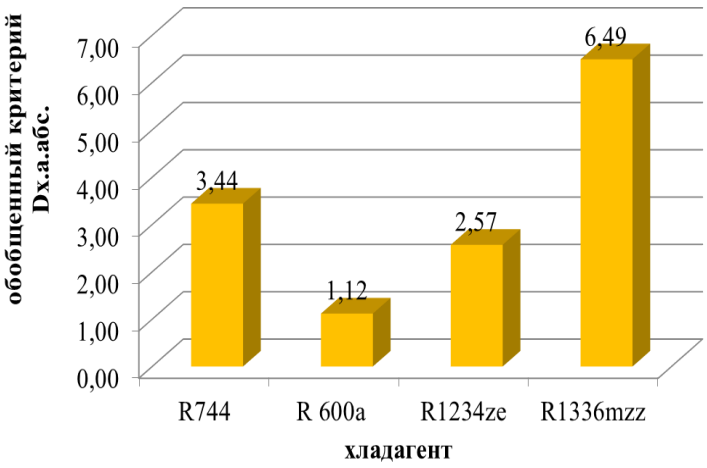

Рис. 14 – Значения обобщенного критерия $D_{\text{х.а.абс.}}$ для рассматриваемых хладагентов

В шестом разделе «**Обоснование возможности и целесообразности использования теплоты оборотной воды для электрогенерации**» приведена оценка эффективности использования вторичной теплоты на предприятиях пищевой промышленности при ее утилизации и трансформации в электроэнергию посредством паротурбинной установки замкнутого цикла на низкокипящем рабочем теле, работающей по органическому циклу Ренкина.

Для работы любой тепловой машины нужен источник теплоты с высоким температурным уровнем – нагреватель и источником теплоты с низким температурным уровнем – холодильник. Нагревателем в нашем случае является вода системы оборотного водоснабжения с температурой 303…318 К; холодильником – породы на глубине от 30 до 100 метров со средней

температурой плюс 285 К. Для дальнейшего анализа были приняты следующие параметры: температура нагревателя $T_{В1}$ = 313 К; температура воды, возвращаемой в технологическую цепочку, $T_{В2}$ = 300 К; температура холодильника $T_х$ = 285 К; тепловой поток от низкопотенциального источника $Q_{НПИ}$ = 1 МВт; КПД электрогенератора $\eta_э$ = 0,95. Схема энергогенерирующего комплекса для трансформации низкопотенциальной теплоты в электроэнергию представлена на рисунке 15. Ввиду очевидно малого теплоперепада для расчёта приняты паротурбинная установка с пароперегревателем, с одновенечной, с одной ступенью скорости, конденсационной осевой турбиной, работающей на перегретом паре. Следует отметить, что вопрос выбора низкокипящего рабочего тела (НРТ) является ключевым как для холодильной техники, так и для энергетики.

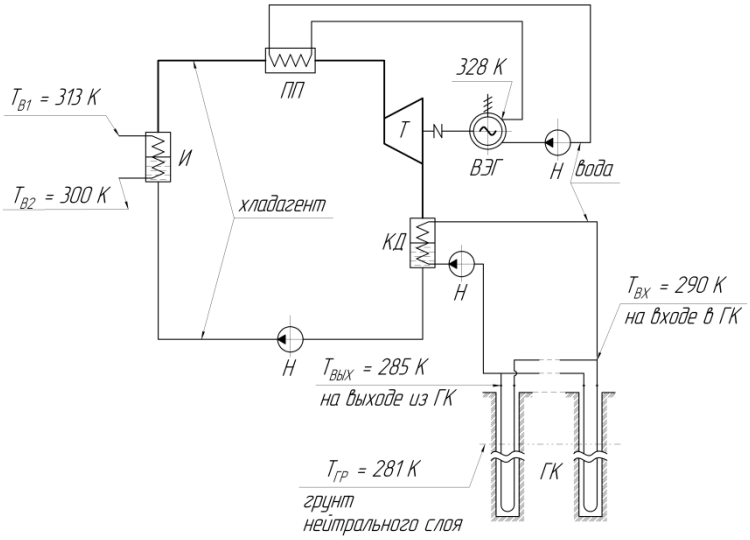

Рис. 15 – Схема энергогенерирующего комплекса с геотермальными зондами

Методика подбора хладагента, предложенная в пятом разделе, так же может быть применена и для ОЦР.

На основании термодинамического цикла и теплового расчета паротурбинной установки установлено, что полный КПД электрогенерации данного комплекса при заданных параметрах составляет 3…4 %. Несмотря на довольно низкий показатель, полученная электроэнергия является экологически чистой.

В седьмом разделе «**Технико-экономическая оценка предложенных решений по использованию теплоты оборотной воды на предприятиях пищевых производств»** с учетом интересов экономической и экологической политики потребителей оборотной воды разработан ряд критериев и интегральных показателей для анализа эффективности использования теплоты охлаждающей воды в оборотных циклах водоснабжения. Перечень критериев и формулы для их расчета приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Критерии для анализа технико-экономической эффективности использования теплоты охлаждающей воды в циклах оборотного водоснабжения

Название критерия	Формула	Величины, входящие в формулу	Назначение критерия
Степень использования теплоты в системе оборотного водоснабжения	$\eta_{эф} = \frac{Q_{пол}}{Q}$. (20)	Q – тепловая мощность, которую необходимо отбирать от оборотной воды, Вт; $Q_{пол}$ – полезно	Показывает долю полезно использованной теплоты от теплоты, которую.

Продолжение табл. 4

		используемая тепловая мощность, отбираемая от оборотной воды после реконструкции системы оборотного водоснабжения, Вт.	необходимо отвести от охлаждаемой воды. Теоретический $\eta_{эф}$ меняется в пределах от 0 до 1
Предельное значение степени использования теплоты в системе оборотного водоснабжения:		$Q_о$, $Q_{гв}$, $Q_в$ – расчетные тепловые мощности отопления, горячего водоснабжения и вентиляции всех объектов предприятия;	Показывает максимально возможное (теоретическое) значение степени использования теплоты.
а) в случае прямого использования теплоты воды	$\eta_{эф}^{пред} = \frac{Q_о + Q_{гв} + Q_в}{Q}$. (21)		
б) в случае использования технологии на базе теплового насоса	$\eta_{эф}^{пред} = \frac{(Q_о + Q_{гв} + Q_в)(\mu_{тн} - 1)}{Q}$.(22)	$\mu_{тн}$ – коэффициент теплотрансформации используемой ПТНУ.	
Нереализованный потенциал энергосбережения	$ПЭ = \frac{\eta_{эф}^{пред} - \eta_{эф}}{\eta_{эф}^{пред}} \cdot 100$. (23)		Показывает разницу между теоретической и реальной степенью использования теплоты в системе оборотного водоснабжения.
Энергетическая эффективность способа утилизации теплоты	$K_{эн} = \frac{Q_{пол}}{N}$. (24)	N – мощность источников энергии (прежде всего электроэнергии), задействованных для организации отбора от оборотной воды тепловой мощности $Q_{пол}$ и ее полезного использования.	Оценивает энергетическую эффективность способа утилизации теплоты
Дополнительные эксплуатационные затраты при организации полезного использование теплоты оборотной воды	$ДЗ = \Delta З_{исп} - \Delta З_{баз}$. (25)	$\Delta З_{баз}$ – уменьшение эксплуатационных затрат на водоохлаждающем устройстве, связанное с уменьшением проходящего через него объема воды; $\Delta З_{исп}$ – эксплуатационные затраты, связанные с обслуживанием устройств, полезно использующих теплоту оборотной воды	Для оценки дополнительных эксплуатационных затрат при организации полезного использование теплоты оборотной воды

Продолжение табл. 4

Абсолютная стоимость сэкономленных энергоносителей		$Q_{нр}$ – теплота сгорания природного газа, кДж/м^3; η – КПД устройства, использующего природный газ; $Ц_г$ – стоимость природного газа, руб./1000 м^3; $Ц_э$ – стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч; $n_р$ – продолжительность работы системы, с/год.	Определяет абсолютную стоимость сэкономленных энергоносителей
а) в случае использования природного газа в базовом наборе оборудования, задействованном для решения задач теплоснабжения	$Ст_г = \frac{Q_{пол}}{Q_{нр} \cdot \eta} \cdot \frac{1}{1000} \cdot Ц_г \cdot n_р$ (26)		
б) в случае использования электроэнергии	$Ст_э = \frac{Q_{пол}}{3600} \cdot Ц_э \cdot n_р$. (27)		
Относительная стоимость сэкономленных энергоносителей, руб./(год·МВт):			Определяет относительную стоимость сэкономленных энергоносителей
а) для природного газа	$Ст_г^{отн} = \frac{Ст_г}{Q}$. (28)		
б) для электроэнергии	$Ст_э^{отн} = \frac{Ст_э}{Q}$. (29)		
Годовой экономический эффект от реконструкции	$Эк = Ст_г - ДЗ$. (30)		Определяет годовой экономический эффект
Срок окупаемости:	$Т_{ок} = \frac{Инв}{Эк} = \frac{Инв}{Ст_г - ДЗ}$. (31)	Инв – объем инвестиций, руб.	Определяет срок окупаемости

На примере типового ППП выполнена оценка технико-экономической эффективности инвестиционных проектов по внедрению теплоутилизационных установок (на базе ПТНУ, системы «теплый пол», вакуумных радиаторов, водяных калориферов) при условии полной компенсации расчетного потребления тепловой энергии предлагаемыми вариантами ЭПС по производственным цехам по таким пунктам, как: потребление тепловой энергии на отопление; потребление тепловой энергии на горячее водоснабжение; потребление тепловой энергии на вентиляцию.

Анализ каждого инвестиционного проекта производился с использованием таких показателей, как: чистый дисконтированный доход (ЧДД) или интегральный эффект; индекс доходности (ИД); внутренняя норма доходности (ВНД); срок окупаемости $T_{ок}$.

Расчеты параметров экономической эффективности инвестиционных проектов по внедрению различных теплоутилизационных установок, использующих теплоту оборотной воды ППП, приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Данные расчета экономической эффективности инвестиционных проектов по внедрению различных теплоутилизационных установок, использующих теплоту оборотной воды ППП

Параметр	Ед. изм	использование теплоты оборотной воды для контура ГВС (все цеха и admin. корпус)	ПТНУ, работающая на хладагентах четвертого поколения, для контура ГВС (все цеха и admin корпус)	ПТНУ, работающая на хладагентах четвертого поколения, для контура ГВС (admin. корпус)	фанкойлы для теплоснаб-жения помещений admin. корпуса	вакуумные радиаторы для теплоснабжения помещений admin. корпуса	ПТНУ, работающая на хладагентах четвертого поколения для теплоснабже-ния помещений admin.корпуса	«теплый пол» для теплоснабжения помещений admin. корпуса
Темпы инфляции	%	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9
Номинальная ставка дисконта $E_н$	%	30	30	30	30	30	30	30
Срок эксплуатации	год	25	25	25	20	20	25	25
Реальная ставка дисконтирования, $E_р$	$год^{-1}$	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Коэффициент дисконтирования (за период эксплуатации)	$год^{-1}$	6,95	6,95	6,95	6,58	6,58	6,95	6,95
Капитальные затраты K	руб	520 000,00	700 000,00	250 000,00	1 240 051,85	1 402 131,85	1 515 000,00	1 839 348,00
Экономический эффект (R_0-$З_0$)	руб	228 751,56	206 959,78	47 460,05	526 528,85	582 461,40	316 679,52	586 550,45
Чистый дисконти-рованный доход ЧДД	руб	1 069 089,99	738 370,50	79 847,32	2 224 507,95	2 430 464,19	685 922,70	2 235 297,17
Индекс доходности ИД	-	2,06	1,05	0,32	1,79	1,73	0,45	1,22
Дисконтированный срок окупаемости $T_{ок}$	год	2,5	4,0	7,4	2,6	2,6	6,4	3,6
Простой срок окупаемости $T_{ок_пр}$	год	2,3	3,4	5,3	2,4	2,4	4,8	3,1

Наиболее инвестиционно привлекательным является системы теплоснабжения на базе фанкойлов и вакуумных радиаторов, однако системы на базе ТНУ, имеющие больший срок окупаемости, наиболее отвечают концепции низкоуглеродной «зеленой энергетики».

Учитывая то, что инновационные нововведения, с одной стороны, определяются рядом экономических, технологических и природных факторов, а, с другой стороны, должны полностью соответствовать нормативным документам по сохранению качества окружающей среды.

Также была определена экономическая эффективность и степень экологического воздействия на окружающую среду предложенного в шестом разделе энергогенерирующего комплекса (ЭК), использующего в качестве первичного источника теплоты выбросы низкопотенциальной теплоты в цикле оборотного водоснабжения ППП.

Суммарный экономический эффект этого цикла состоит из трёх компонентов:

- стоимости экологически чистой электроэнергии, вырабатываемой непосредственно на предприятии за счёт собственных ресурсов;
- величины предотвращённого экологического ущерба в результате снижения потребления электроэнергии от внешнего источника – тепловой электрической станции (ТЭС);
- средств, получаемых в соответствии с пунктом 9, статьи 11 Федерального закона от 6 марта 2022 г. № 34-ФЗ от реализации передачи избыточных единиц выполнения квоты по выбросам парниковых газов иному лицу, которые направляются на возмещение затрат на производство товаров, выполнение работ, оказание услуг, при достижении углеродной нейтральности региональной регулируемой организации.

Полное использовании низкопотенциального теплового потока в 1 МВт с целью электрогенерации позволит снизить вредные выбросы в атмосферу по сравнению с внешним источником электроснабжения – ТЭС за годовой цикл работы парниковых газов на 295,33 т; NO_x на 0,406 т; летучей золы на 29 т; потребление O_2 – на $1{,}77 \cdot 10^5$ м^3 или 253 т., при этом экологическая составляющая суммарного экономического эффекта достигнет величины 156 тыс.руб. в год.

Представленный в работе оценочный расчёт показывает, что стоимость предложенного ЭК составит 6,313 млн. рос. руб., срок его окупаемости, только за счёт собственной электрогенерации составит 5,6 года, а при развитии в РФ системы торговли углеродными единицами срок окупаемости снизится до 4,9 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие научно-технических основ повышения эффективности промышленных систем оборотного водоснабжения предприятий пищевых производств заключается в совершенствовании тепломассообменных процессов, протекающих в водоохлаждающих устройствах, и обосновании рациональных параметров технологии утилизации избыточной теплоты оборотной воды

(разработке и обосновании мероприятий, направленных на снижение непроизводительных потерь энергии и наиболее полном использовании низкопотенциальной теплоты оборотной воды ППП). Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. В результате анализа современного состояния и перспектив развития систем оборотного водоснабжения ППП обоснована перспективность использования оборотной воды в качестве вторичного энергетического ресурса и необходимость применения ее в качестве низкопотенциального источника.

2. Предложен научно-обоснованный подход к оценке тепломассопереноса в аппаратах с подвижной насадкой; на основе моделирования получены зависимости, позволяющие при ограниченной эмпирической информации о состоянии псевдоожиженного слоя прогнозировать значение структурных характеристик – количество удерживаемой жидкости, величину поверхности контакта фаз, капельный вынос при изменении конструктивных ($\rho_{эн}$, $d_{эн}$) и режимных ($\omega_г$, $q_ж$) параметров.

3. Развиты теоретические представления об аппаратах с подвижной насыпной насадкой в качестве перспективного решения ТМА для охлаждения оборотной воды ППП, обеспечивающее возможность эксплуатации в экстремальных условиях (загрязненные среды, резкие колебания нагрузок). Экспериментально выявлены лучшие для реализации массообменных процессов диапазоны плотности насадочного слоя $\rho_{эн}$II ($\rho_{эн}$ = 200…700 кг/м^3), отличающийся широким рабочим участком по $\omega_г$, приемлемыми значениями отнесения жидкости и сравнительно небольшой динамической высотой слоя, и влияющие на повышение эффективности работы ТМА.

4. Получил дальнейшее развитие метод нечетких множеств, основанный на многокритериальном подходе к оптимальному выбору хладагентов, который предложено использовать для поиска компромисса между энергоэффективностью, экологическими ограничениями и экономическими показателями при разработке концептуальных технологий преобразования низкопотенциальной теплоты.

5. Впервые теоретически обоснована принципиальная возможность использования природных хладагентов R-744 и R600a и хладагента четвертого поколения R1234ze в качестве рабочих тел для среднетемпературных ПТНУ типа «вода-вода» для горячего водоснабжения производственных, административных и жилых помещений.

6. Впервые предложена схема энергогенерирующего комплекса для трансформации технологической низкопотенциальной теплоты воды в цикле оборотного водоснабжения предприятия в электроэнергию. Теоретически определены технические характеристики предлагаемой установки, установлено, что при мощности потребляемого низкопотенциального теплового потока в 1МВт КПД данного комплекса достаточно низок (3,4 %). Однако полученная электроэнергия является экологически чистой и не требует использования топлива и других видов высокопотенциальных энергоресурсов. Для повышения КПД предлагаемой установки и приближения его к КПД идеального цикла Карно,

необходима разработка дополнительного оборудования, повышающего температуру низкокипящего рабочего тела на выходе из пароперегревателя за счёт использования НПТ. Показано, что полное использовании низкопотенциального теплового потока в 1МВт с целью электрогенерации позволит снизить вредные выбросы в атмосферу по сравнению с внешним источником электроснабжения – ТЭС за годовой цикл работы ПГ на 295,33 т; NO_x на 0,406 т; летучей золы на 29 т; потребление O_2 – на $1{,}77 \cdot 10^5$ м^3 или 253 т), при этом экологическая составляющая суммарного экономического эффекта достигнет величины 156 тыс. руб. в год.

7. Впервые для комплексной оценки эффективности систем оборотного водоснабжения с точки зрения полезного использования теплоты оборотной воды предложена система интегральных критериев: степень использования теплоты в системе оборотного водоснабжения, нереализованный потенциал энергосбережения, коэффициент энергетической эффективности способа утилизации теплоты, относительная стоимость сэкономленных энергоносителей; годовой экономической эффект от реконструкции, обеспечивающей полезное использование теплоты оборотной воды, и срок окупаемости проекта по реконструкции.

8. На примере предприятия пищевых производств теоретически обоснована целесообразность инвестиционных проектов по внедрению теплоутилизационных установок (ТУУ) на базе ПТНУ, системы «теплый пол», вакуумных радиаторов, водяных калориферов при условии полной компенсации расчетного потребления тепловой энергии предлагаемыми вариантами ТУУ по основным цехам по таким пунктам, как: потребление тепловой энергии на отопление; потребление тепловой энергии на горячее водоснабжение; потребление тепловой энергии на вентиляцию. Наиболее инвестиционно привлекательным являются системы теплоснабжения на базе фанкойлов и вакуумных радиаторов, однако системы на базе ПТНУ, имеющие больший срок окупаемости, наиболее отвечают концепции низкоуглеродной «зеленой энергетики».

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых изданиях из перечня ВАК ДНР

1. Карнаух, В.В. Вивчення особливостей гідродинаміки в апаратах із рухомою насадкою / В.В. Карнаух, О.В. Дорошенко // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. пр. / М-во освіти і науки України, Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – 2008. – Вип. 18. – С. 293–301.
2. Карнаух, В.В. Дослідження структури контактуючих потоків і характер руху рідини в апаратах з рухомою насадкою / В.В. Карнаух, О.В. Дорошенко // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. пр. / М-во освіти і науки України, Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – 2009. – Вип. 21. – С. 190–199.

3. Карнаух, В.В. Про методику розрахунку плівкових поперечноточних вентиляторних градирень // Прогресивна техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : темат. зб. наук. пр. / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. – Харків, 2010. – Вип. 2. – С. 115–123.
4. Карнаух, В.В. Про методику розрахунку плівкових вентиляторних градирень з урахуванням нерівномірності розподілу контактуючих потоків // Харчова наука і технологія. – 2010. – № 4. – С. 78–82.
5. Карнаух, В.В. Про використання сонячних колекторів у системі гарячого водопостачання хлібозаводу ООО «Маріупольский хлібокомбінат» // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. пр. – 2010. – Вип. 24. – С. 190–199.
6. Карнаух, В.В. Об использовании гелиосистем в системах теплоснабжения на предприятиях пищевых производств // Холодильная техника и технология. – 2010. – № 6 (128). – С. 190–199.
7. Інтегрована теплонасосна система теплопостачання з приводом компресора від двигуна зовнішнього згоряння / А.Є. Денисова, П.О. Котов, В.В. Карнаух, Ю.В. Пянкова // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. пр. / М-во освіти і науки України, Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – 2011. – Вип. 26. – С. 47–53.
8. Кравцов, В.В. Про використання теплових насосів для покриття навантажень гарячого водопостачання та опалення / В.В. Кравцов, С.В. Грідін, В.В. Карнаух // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. пр. / М-во освіти і науки України, Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – 2012. – Вип. 29. – С. 106–113.
9. Данько, В.П. Исследование влияния концентрации раствора абсорбента на охлаждающую способность тепломассообменных аппаратов с подвижной насадкой / В.П. Данько, В.В. Карнаух // Вестник Международной академии холода. – 2016. – Вып. 3. – С. 73–78.
10. Мазур, В.А. О выборе рабочего тела с заданными свойствами для органического цикла Ренкина = Working fluid selection for organic Rankine cycle / В.А. Мазур, В.В. Карнаух // Оборудование и технологии пищевых производств : темат. сб. науч. работ / М-во образования и науки Донец. Нар. Респ., Донец. нац. ун-т экономики и торговли им. Михаила Туган-Барановского. – Донецк, 2016. – Вып. 33. – С. 42–51. – Текст на англ. яз.
11. Карнаух, В.В. Анализ возможности прямого использования теплоты оборотной воды для решения задач теплоснабжения / В.В. Карнаух, А.Б. Бирюков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г, Технические науки. – 2021. – Вып. 2. – С. 84–94.
12. Карнаух, В.В. Исследование влияния параметров охлаждения на эффективность работы кожухотрубчатых конденсаторов в условиях пищевых производств / В.В. Карнаух, А.Б. Бирюков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г, Технические науки. – 2021. – Вып. 3. – С. 96–105.

13. Карнаух, В.В. Разработка критериев для анализа эффективности использования теплоты охлаждающей воды в оборотных циклах водоснабжения / В.В. Карнаух, А.Б. Бирюков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г, Технические науки. – 2021. – Вып. 4. – С. 64–69.
14. Карнаух, В.В. Об использовании теплоты оборотной воды для электрогенерации / В.В. Карнаух, А.Б. Бирюков, В.В. Варакута // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г, Технические науки. – 2022. – Вып. 1. – С. 94–105.
15. Карнаух, В.В. Эколого-экономический анализ энергогенерирующего комплекса, использующего теплоту оборотной воды / В.В. Карнаух, А.Б. Бирюков, В.В. Варакута // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г, Технические науки. – 2022. – Вып. 2. – С. 84–91.

В рецензируемых периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

16. Karnaukh, V.V. An Application of CO2 as a Refrigerant for Medium Temperature Heat Pumps = О применении CO2 в качестве холодильного агента для среднетемпературных тепловых насосов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия, Техника и технологии = Journal of Siberian Federal University. Engineering and technologies. – 2021. – Т. 14, № 6. – С. 703–714. – Текст на англ. яз.
17. Karnaukh, V.V. Specifics of Calculation and Prediction of the Operation of Heat Pumps Working on Fourth Generation Refrigerants = Особенности расчета и прогнозирования работы теплонасосных установок на хладагентах четвертого поколения // Журнал Сибирского федерального университета. Серия, Техника и технологии = Journal of Siberian Federal University. Engineering and technologies. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 202–215. – Текст на рус. яз.

В рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК ДНР, включенных в Международные наукометрические базы

18. Comparative analysis of different refrigerant using in the high temperature vapor-compression heat pump = Сравнительный анализ различных холодильных агентов, используемых в высокотемпературных тепловых насосах / Viktoriia V. Karnaukh, Viktor A. Mazur, Alexey B. Biryukov, Konstantin A. Rzesik // International journal of energy for a clean environment. – 2017. – Vol. 18, is. 2. – P. 161–174. – URL: http://www.dl.begellhouse.com/journals/6d18a859536a7b02,0fb0a4bd605e9597.html. **(Scopus)**.
19. Artemenko S. Phase behavior of liquids embedded with graphene genealogic tree nanoparticles / Sergey Artemenko, Victoria Karnaukh and Victor Mazur. – DOI 10.1007/978-3-319-61109-9_3 // Springer Proceedings in Physics. – 2018. – Vol. 197 : Modern problems of molecular physics : selected reviews from the 7th International conference “Physics of Liquid Matter: Modern Problems”, Kyiv, Ukraine, May 27 − 31, 2016. – P. 39–47. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-61109-9_3 **(Scopus)**.

20. Trade-off working fluid selection for heat pumps / V.V. Karnaukh, V.A. Mazur, A.B. Biryukov, K.A. Rzhesik. – DOI 10.1088/1757-899X/791/1/012066 // IOP Conference Series : materials science and engineering. – 2020. – Vol. 791 : IV International scientific and technical conference "Energy Systems", 31 October – 1 November 2019, Belgorod, Russia. – URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/791/1/012066 (**Scopus**).

Монографии

21. Карнаух, В.В. Анализ способов использования низкопотенциальной теплоты в системах водоснабжения промышленных предприятия / Инновации в хладотеплотехнике : монография / К.А. Ржесик, Д.К. Кулешов, А.Н. Бирюков [и др.]; под ред.: Ржесика К.А. – Донецк : ДонНУЭТ, 2019. – 289 с. – Гл. 9. – С. 206–235.
22. Карнаух, В.В. Критерии выбора рабочего тела для парокомпрессионных установок, использующих техногенную теплоту оборотной воды промышленных предприятий // Единство науки и образования как инструмент перехода к постиндустриальному миру : монография. – Вып. 70. – Уфа: АЭТЕРНА. – 200с. – Гл. 3. – С. 40-57.

Публикации в других изданиях

23. Перспективы использования интегрированных теплонаносных установок для ТЭС и АЭС / Денисова А.Е., Бирюк В.Ю. Карнаух В.В., Пьянкова Ю.В. // Холод-2011. Проэкология и энергосбережение : материалы науч.-техн. конференции, посвященной 80-летию СПбГУНиПТ / С-Петерб. гос. ун-т низкотемператур. и пищевых технологий. – Санкт-Петербург, 2011. – С. 53–55.
24. Karnaukh, V.V. About the usage of helio-systems for heat supply on food manufacturing facilities / V.V. Karnaukh // Modern Tehnologies in the Food Industry – 2012: proceedings of the International Conference, 2012 / The Min. of Educational of the Rep. of Moldova, The Min. of Agriculture and Food Industry of Moldova, Techn. Univ. of Moldova. – Moldova, 2012. – 112-114.
25. Karnaukh, V.V. Modeling of nanofluid thermodynamic properties / V.V. Karnaukh, V.A. Mazur // THERMAM 2014 : abstracts proceedings of the International conference on thermophysical and mechanical properties of advanced material and 3rd Rostocker symposium on thermophysical properties for technical thermodynamics, 12–15 June 2014 / Dokuz Eylul University. – Izmir, 2014. – P. 28.
26. Karnaukh, V.V. Thermodynamic and hydrodynamic bevavior of nanofluids in cooling systems / V.V.Karnaukh, V.A.Mazur // Heat piper, heat pumps, refrigerators, power sources: proceedings of the IX Minsk international seminar, 7–10 September 2015 / National academy of science of Belarus, Luikov heat and mass transfer institute. – Minsk, 2015. – P. 86–94.
27. Карнаух, В.В. Водоохлаждающие устройства в системах водоснабжения металлургических предприятий / В.В. Карнаух, А.Б. Бирюков // Черная металлургия : бюл. науч.-техн. и экон. информации. – 2016. – Вып. 6 (1398). – С. 88–97. – URL: https://chermetinfo.elpub.ru/jour/issue/view/21/showToc.

28. Карнаух, В.В. Исследование физической структуры движения потоков жидкости в аппаратах с подвижной насадкой / В.В. Карнаух, В.П. Данько // Научная дискуссия: вопросы математики, физики, химии, биологии : сб. ст. по материалам XXXVIII междунар. науч.-практ. конф. № 2 (30). – М., Изд. «Интернаука», 2016. – С. 53–58.
29. Karnaukh, V.V. Phase equilibria in fluid mixtures embedded with graphene genealogic tree nanoparticles / V.V.Karnaukh, V.A. Mazur // THERMAM 2016 : proceedings of the 3rd International conference on thermophysical and mechanical properties of advanced material, 1–3 September 2016 / Dokuz eylul university. – Izmir, 2016. – P. 256–265.
30. Карнаух, В.В. Теоретические исследования применения природных холодильных агентов на примере диоксида углерода в высокотемпературных тепловых насосах / В.В. Карнаух, А.Б. Бирюков, В. Шмелёва // Энергетические системы : сб. тр. II Междунар. науч.-техн. конф., 23–24 нояб. 2017 г. / Белгород. гос. технолог. ун-т. – Белгород, 2017. – С. 39–46. – URL: http://es.bstu.ru/archive/2017.
31. Карнаух, В.В. Определение оптимального режима работы регулярной насадки в теплообменных аппаратах / В.В. Карнаух, А.Б. Кудрин, В.П. Данько // Современное развитие России : материалы II Междунар. науч.-практ. конф., 19–20 апр. 2018 г. / Мин-во образования и науки Рос. Федерации, Рос. экон. ун-т им. Г.В. Плеханова. – Краснодар, 2018. – С. 261–263.
32. Карнаух, В.В. О применении мультикритериального подхода при выборе холодильного агента для парокомпрессионного теплового насоса / В.В. Карнаух, А.Б. Бирюков, В. Шмелёва // Энергетические системы : сб. тр. III Междунар. науч.-техн. конф., 29–30 нояб. 2018 г. / Белгород. гос. технолог. ун-т. – Белгород, 2018. – С. 208–213. – URL: http://es.bstu.ru/archive/2018.
33. Карнаух, В.В. Особенности гидродинамики в теплообменных аппаратах с насадочным слоем для охлаждения воды / В.В.Карнаух, М.А. Пундик // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г, Технические науки. – Донецк, 2018. – Вып. 3. – С. 57–66.
34. Карнаух, В.В. О применении диоксида углерода как рабочего тела для теплонасосных установок / В.В. Карнаух, В.В. Шмелёва // Агропромышленная политика Донецкой Народной Республики: реалии и перспективы : сб. материалов II междунар. научн.- практ. конф. «Экономика Донбасса: векторы социально-экономического и исторического развития» / М-во образования и науки Донец. Нар. Респ., Донец. нац. ун-т экономики и торговли им. Михаила Туган-Барановского. – Донецк, 2019. – С. 128–135.
35. Байда, Б.Ю. Энергетическое и эксергетическое исследование R1234YF, R1234ZE для парокомпрессионной теплонасосной установки / Б.Ю. Байда, В.В. Карнаух, А.Б. Бирюков // Энергетические системы : IV Междунар. науч.-техн. конф., Белгород, 19–20 нояб. 2020 г. : сб. тр. / Белгород. гос. технолог. ун-т. – Белгород, 2020. – С. 145–153.
36. Карнаух, В.В. Эксергетический анализ работы теплонасосной установки, утилизирующей низкопотенциальную теплоту р. Кальмиус / В.В. Карнаух,

Б.Ю. Байда, Д.В. Гатицкий, // Оборудование и технологии пищевых производств : темат. сб. науч. работ / М-во образования и науки Донец. Нар. Респ., Донец. нац. ун-т экономики и торговли им. Михаила Туган-Барановского. – Донецк, 2020. – Вып. 12 (45). – С. 16–21.

37. Байда, Б.Ю. Анализ современного состояния вопроса применения тепловых насосов, работающих на CO_2, в пищевой промышленности / Б.Ю. Байда, В.В. Карнаух // Оборудование и технологии пищевых производств : темат. сб. науч. работ / М-во образования и науки Донец. Нар. Респ., Донец. нац. ун-т экономики и торговли им. Михаила Туган-Барановского. – Донецк, 2021. – Вып. 13 (46). – С. 43–49.
38. Karnaukh, V.V. An application of natural refrigerants for medium temperature heat pumps / V.V. Karnaukh // Современный Казахстан: реформы образования и науки : материалы науч.-практ. конф. / Евраз. технолог. ун-т – Алматы, 2021. – С. 240–244.
39. Karnaukh, V.V. An application of CO2 as a refrigerant for medium temperature heat pumps / V.V. Karnaukh, Hakan Serhad Soyhan, M.A. Pundik // Инновационные направления интеграции науки, образования и производства : сб. тез. докл. участников II Междунар. науч.-практ. конф. (Керчь, 19–23 мая 2021 г.) / Керч. гос. мор. технолог. ун-т [и др.]. – Керчь, 2021. – С. 82–86.
40. Карнаух, В.В. Особенности расчета и прогнозирования работы теплонасосных установок на хладагентах четвертого поколения // Материалы пула научно-практических конференций, Донецк, Керчь, Луганск / М-во образования и науки Донец. Нар. Респ., Донец. нац. ун-т экономики и торговли им. Михаила Туган-Барановского [и др.]. – Керчь, 2022. – С. 177–180. – URL: https://www.kgmtu.ru/documents/nauka/2022/Sbornik_Sochi_2022.pdf.

АННОТАЦИЯ

Карнаух В.В. Развитие научных основ совершенствования процессов охлаждения оборотной воды и использования ее теплоты на предприятиях пищевых производств. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика. Государственная организация высшего профессионального образования «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского» Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики, Донецк, 2022.

В диссертационной работе проведены теоретические и экспериментальные исследования для решения народно-хозяйственной проблемы по модернизации теплового хозяйства предприятий пищевых производст путем рационального использования теплоты оборотной воды, что является актуальным на современном этапе развития энергетического сектора Донецкой Народной Республики.

Предложен научно-методологический подход для рациональной утилизации оборотной воды с температурным уровнем +25…+45 ºС.

Разработана модель цифрового двойника водяного конденсатора, с помощью которого можно определять реальные количественные характеристики работы соответствующих аппаратов в зависимости от расхода охлаждающей воды и ее входной температуры. Получило дальнейшее развитие моделирование процессов совместного тепломассообмена при испарительном охлаждении оборотной воды в градирне с подвижными насыпными насадками, что позволило установить зависимости по

определению важнейших гидродинамических характеристик, необходимых для инженерных расчетов подобных водоохлаждающих аппаратов.

Получил дальнейшее развитие научно-методологический подход для расчета и прогнозирования работы парокомпрессионных теплонасосных установок, работающих на хладагентах четвертого поколения и использующих оборотную воду предприятий пищевых производств как низкопотенциальный ресурс, на основе современных эколого-энергетических показателей. Впервые при помощи метода нечетких множеств, основанного на многокритериальном подходе к выбору решения, разработана методика рационального выбора рабочих тел для энергопреобразующих систем, использующих в качестве источника теплоту оборотной воды.

Предложены концептуальные положения по комбинированной утилизации оборотной воды на предприятиях пищевых производств, которые позволяют генерировать электроэнергию и обеспечивать нагрузки горячего водоснабжения, что позволит модернизировать тепловое хозяйство предприятий пищевых производств.

Ключевые слова: оборотная вода, низкопотенциальная теплота, хладагент, энергопреобразующие системы, парокомпрессионный тепловой насос, теплоснабжение.

ANNOTATION

Karnaukh V.V. Development of scientific bases for improving the processes of cooling recycled water and using its heat at food production companies. – As a manuscript.

The dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.14.04 - Industrial heat power engineering. State Organization of Higher Professional Education "Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovsky" of the Ministry of Education and Science of the Donetsk People's Republic, Donetsk, 2022.

In the dissertation work, theoretical and experimental studies were carried out in order to solve the national economic problem of modernization the thermal economy of food production enterprises through the rational use of the heat of recycled water, which is relevant at the current phase of development of the energy sector of the Donetsk People's Republic.

The scientific and methodological approaches for the rational utilization of recycled water with a temperature level of +25…+45 ^{o}C are proposed. A model of a digital twin of a water condenser is developed with the help of which one can determine the real operation quantitative characteristics of the relevant equipment depending on the cooling water flow rate and its inlet temperature. The modeling of the heat-mass transfer processes under evaporative cooling of recycled water in a cooling tower with movable packing elements was further developed. It allowed to establish dependences for determining the the most important hydrodynamic characteristics required for engineering calculations of such water-cooling equipment.

The scientific and methodological approach for calculation and prediction of operation of vapor-compression heat pumps operating on fourth-generation refrigerants and using recycled water of food production companies as a low-potential resource, based on modern ecological and energy indicators, has been further developed.

For the first time, using the method of fuzzy sets based on a multi-criteria solution approach, a method of rational choice of working fluids for energy-converting systems that use the heat of recycled water as a source was elaborated.

Conceptual provisions for the combined utilization of recycled water of food production companies, which generate electricity and provide hot water loads, have been proposed. It will enable heat economy modernization of food production enterprises.

Key words: recycled water, low-potential heat, refrigerant, energy-converting systems, vapor-compression heat pump, heat supply.

Подписано в печать 09.12.2022. Формат 60х84/16.
Усл. печ. лист. 2.0 . Тираж 100 экз. Заказ № _____.

Отпечатано ФЛП Кириенко С.Г.
Свидетельство о государственной регистрации физического лица-предпринимателя № 40160 серия АА02 от 05.12.2014 г.
ДНР, 83014, г. Донецк, пр. Дзержинского, 55/105.