

На правах рукописи

Выборнов Дмитрий Владимирович

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОТЫ ШАХТНЫХ ВОД С ПОМОЩЬЮ
ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ ТЕПЛОАСОСНЫХ УСТАНОВОК**

05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха,
газоснабжение и освещение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Макеевка – 2016

Работа выполнена в Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, г. Макеевка.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Монах Светлана Игоревна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Недопекин Федор Викторович,
Донецкий национальный университет,
кафедра физики неравновесных процессов,
метрологии и экологии;

доктор технических наук, доцент
Трубаев Павел Алексеевич,
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный
технологический университет им. В.Г. Шухова»,
профессор кафедры энергетики
теплотехнологии.

Ведущая организация: ГВУЗ «Донецкий национальный технический
университет»,
г. Донецк.

Защита состоится «26» мая 2016 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.005.01 при Донбасской национальной академии строительства и архитектуры по адресу: 86123, г. Макеевка, ул. Державина 2, зал ученого совета. Тел. факс: +38(0623) 22-77-19, e-mail: d01.005.01@donnasa.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донбасской национальной академии строительства и архитектуры по адресу: 86123, г. Макеевка, ул. Державина 2 (<http://donnasa.ru>).

Автореферат разослан «___» апреля 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 01.005.01

Удовиченко Злата Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На сегодняшний день на большинстве промышленных предприятий имеется такой вид источника низкопотенциальной теплоты как отходы технологического водоснабжения. Применительно к промышленности Донбасса, в частности, к шахтам – это сбросные шахтные воды, имеющие тепловой потенциал, достаточный для его утилизации и использования в системах теплоснабжения.

В то же время имеет место негативное влияние сбросных технологических стоков, а именно шахтной воды, на экосистему региона, в частности теплоты шахтной воды, которая сбрасывается непосредственно в открытые водоемы. При этом происходит загрязнение водных и земельных ресурсов как взвешенными и растворенными веществами, так и путем искусственного повышения температуры среды, что негативным образом сказывается на экологической обстановке в регионе.

Одна из задач, поставленных в качестве условия для успешного развития теплогенерации, – это рациональное использование низкопотенциальных источников теплоты с помощью теплонасосных установок (ТНУ). С другой стороны, назрела необходимость в решении, позволяющем утилизировать бросовую теплоту вод шахтного водоотлива.

Следующим фактором, определяющим необходимость исследований, является увеличение практики применения тепловых насосов (ТН). Так как в силу широкого ассортимента соответствующего оборудования на рынке, довольно затруднительно подобрать соответствующий ТН, обеспечить наиболее эффективную схему теплоснабжения с его помощью, а также подобрать тип и параметры теплоносителей. Следовательно, есть необходимость в обоснованной методике выбора схемы ТНУ и типа хладагента (ХА) в зависимости от конкретных исходных параметров первичного теплоносителя, в частности сбросных шахтных вод. Из всего вышеизложенного вытекает актуальность темы работы.

Степень разработанности темы.

Фундаментальными исследованиями в области применения ТНУ в системах теплоснабжения, а также анализом их эффективности занимались такие известные ученые как Д.Х. Харлампида, Ю.М. Мацевитый, Е.И. Янговский, Ю.В. Пустовалов, В. Мааке, Г.-Ю. Эккерт.

Современные вопросы эксплуатации ТНУ были рассмотрены в работах таких ученых как В.Б. Скрыпников, П.А. Трубаев, Б.М. Гришко, В.А. Потапова, С.И. Монах, С.А. Горожанкин, А.А. Редько. Применение ТНУ в системах охлаждения шахтных компрессоров было освещено в работах В.И. Самуси, М.В. Радюка.

Среди зарубежных исследователей выделяются такие ученые как E. Daniel, M. Zogg, E. Kjellsson, D. Sakellari, G. Hellström, J. M. García-Alonso, T. Zakula, Y. J. Hwang, Young Jae Yu, Byrne P, в работах которых рассматривается применение и эксергетический анализ ТНУ для теплоснабжения домов коттеджного типа; в этих

работах предлагаются схемы включения ТН в системы теплоснабжения, а также приводятся модели, описывающие теплообмен в грунтовых теплообменниках различного вида.

Проблемным вопросом существующих ТНУ и имеющихся в этой области разработок является непригодность используемого теплотехнического оборудования к термодинамическим процессам пароконденсационного цикла при утилизации теплоты шахтных вод.

Связь работы с научными программами, планами, темами.

Диссертационные исследования выполнялись в соответствии с Комплексной государственной программой «Энергетическая стратегия Украины до 2030 года», утвержденной Кабинетом Министров Украины от 01.03.2006 г. №145-р., государственной целевой экономической программой энергоэффективности и развития сферы производства энергоносителей из возобновляемых источников энергии и альтернативных видов топлива на 2010-2016 гг., утвержденной Кабинетом Министров Украины от 01.03.2010 г. №273; приоритетными направлениями развития науки и техники в Украине «Экологически чистая энергетика и энергосберегающие технологии», программой научно-технического развития Донецкой области на период до 2020 г. «Донбасс-2020».

Исследования выполнялись в рамках госбюджетных научно-исследовательских тем по заказу Министерства образования и науки Украины: «Разработка методов и способов повышения энергетической и экологической эффективности источников теплоты для локального и индивидуального теплоснабжения» (государственный регистрационный номер 0106U002951), «Разработка теоретических и технологических основ обеспечения внедрения современных технологий систем функционирования ЖКХ» (государственный регистрационный номер 0109U003038), «Разработка теоретических моделей технических и технологических решений обеспечения эффективного функционирования инженерных сетей тепло-, водоснабжения и водоотведения» (государственный регистрационный номер 0111U001806), а также в кафедральной научно-исследовательской теме К 3-03-11 «Совершенствование систем теплогазоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха с использованием современных технологий».

Цель работы. Повышение эффективности ТНУ, использующей теплоту шахтных вод для систем теплоснабжения, путем совершенствования теплообменных процессов на основании параметрического и структурного анализа.

Задачи исследования:

- проанализировать тепловой потенциал шахтных вод для использования в ТНУ, выполнить оценку эффективности использования данного низкопотенциального теплоносителя в ТНУ;

- разработать усовершенствованную математическую модель потоков теплоты и эксергии в ТНУ, использующих теплоту шахтного водоотлива;

- на базе математической модели разработать методику расчета термодинамических и конструктивных параметров различных схем ТНУ;
- провести исследования режимов работы ТНУ при варьировании термодинамических параметров теплоносителей, проверить адекватность разработанной математической модели потоков теплоты и эксергии путем анализа полученных экспериментальных данных;
- разработать эффективную опытно-промышленную модель ТНУ, использующей теплоту шахтных вод;
- оценить экономическую и экологическую эффективность работы ТНУ, использующей теплоту сбросных шахтных вод, при работе в бивалентной схеме с пиковым догревателем.

Объект исследования – теплообменные процессы в парокompрессионных ТНУ, использующих теплоту шахтных вод.

Предмет исследования – термодинамические закономерности теплообменных процессов в парокompрессионных ТНУ, определяющие эффективность утилизации теплоты шахтных вод.

Научная новизна полученных результатов:

- разработана математическая модель потоков теплоты и эксергии для различных схем ТНУ, в том числе работающих по циклу с квазидвухступенчатым сжатием (КДС), позволяющая определять термодинамическую эффективность отдельных процессов и теплонасосной установки в целом, с экспериментальным подтверждением эффективности процессов, протекающих в ТНУ;
- впервые предложена усовершенствованная схема применения парокompрессионной ТНУ с КДС, позволяющая эффективно утилизировать теплоту шахтных вод;
- разработаны рекомендации по выбору ХА, а также определены особенности осуществления цикла применительно к такому источнику низкопотенциальной теплоты как шахтная вода, которые заключаются в использовании цикла с квазидвухступенчатым сжатием для предотвращения перегрева компрессора;
- обоснована эффективность применения ТНУ, использующей теплоту шахтной воды, по бивалентной схеме подключения пикового догревателя, что нашло отражение в патентах на полезную модель №75611 (опубл. 10.12.2012), № 88671 (опубл. 25.03.2014).

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость заключается в следующем:

- предложена математическая модель потоков теплоты и эксергии в ТНУ, использующей теплоту шахтных вод, позволяющая проводить оценку эффективности отдельных узлов и установки в целом как на стадии проектирования, так и на стадии реконструкции;
- разработана методика расчета тепловой и эксергетической эффективности ТНУ для различных условий эксплуатации;

- материалы диссертационной работы включены в рабочие программы учебных дисциплин «Экологические проблемы и энергосбережение», «Вопросы теории и инновационных решений при использовании возобновляемых источников энергии», «Надежность систем ТГВ и пути ее повышения».

Практическая значимость результатов исследований:

- предложена схема опытно-промышленной ТНУ с квазидвухступенчатым сжатием хладагента, переохладителем (ПО) и промежуточным теплообменником (ПТО), подключенной по бивалентной схеме теплоснабжения с пиковым догревателем;

- алгоритм разработанной методики расчетов применен при реконструкции котельной №165 в п. Кирово г. Дзержинска Донецкой области с внедрением тепловых насосов по бивалентной схеме теплоснабжения и котельной «21 Шахта» Советского района г. Макеевки, что подтверждено соответствующими справками о внедрении результатов диссертационных исследований.

Методология и методы исследования. В процессе выполнения работы автором был применен системный подход к термодинамическому анализу работы ТНУ и моделированию тепловых потоков как в ТНУ в целом, так и в отдельных узлах. В ходе выполнения расчетно-аналитических и экспериментальных исследований в силу сложности и многофакторности процессов, протекающих в ТНУ, были применены численные методы обработки данных и приняты определенные упрощения, не влияющие на полученный результат исследований. Планирование экспериментальных исследований осуществлялось с применением дробного факторного эксперимента.

Личный вклад соискателя включает постановку цели и задач исследования, разработку математической модели потоков теплоты и эксергии в установке, методику расчета термодинамической, экономической и экологической эффективности применяемого оборудования, разработку принципиальной и конструктивной схемы опытно-промышленной установки, проведение теоретических и экспериментальных исследований, обработку экспериментальных данных и формирование выводов о целесообразных сферах применения ТНУ, использующих теплоту шахтных вод.

Основные положения, выносимые на защиту:

– математическая модель потоков теплоты и эксергии в ТНУ, использующей теплоту шахтных вод;

– специфика осуществления цикла ТНУ применительно к такому источнику низкопотенциальной теплоты, как шахтная вода, особенности которого состоят в использовании КДС в компрессоре;

– методика расчета и принципы выбора схемы ТНУ, типа ХА, а также схемы включения ТНУ, использующей теплоту шахтных вод для нужд теплоснабжения;

– опытно-промышленная модель ТНУ тепловой мощностью 3,4 МВт, использующей теплоту шахтных вод;

– методика оценки экономической и экологической эффективности утилизации теплоты шахтных вод.

Степень достоверности и апробация результатов диссертационной работы.

Достоверность результатов исследований подтверждается использованием основополагающих положений теории теплообмена, современных методов математического моделирования, а также результатов экспериментальных исследований. Достоверность обеспечивается также широкой публикацией работ по данной теме и обсуждением их на конференциях различного уровня.

Основные результаты диссертации докладывались на: IV Международной конференции молодых ученых «Geodesy, architecture & construction» (г. Львов, 2012 г.); X-XIII Международных конференциях молодых ученых, аспирантов и студентов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (г. Макеевка, 2011, 2012, 2013, 2014); III Международной конференции «Науково-технічне та організаційно-економічне сприяння реформам у будівництві та ЖКГ», (г. Макеевка, 2012 г.); Международной научно-практической конференции «Строительство-2013» (г. Ростов-на-Дону, 2013 г.); двадцатой всеукраинской научно-практической конференции «Інноваційний потенціал світової науки - ХХІ сторіччя» (г. Запорожье, 2013 г.); IV Республиканской научно-практической конференции (г. Бендеры, 2012 г.).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 11 печатных работах, общим объемом 3,79 п.л., лично автором – 2,01 п.л., в том числе 8 работ опубликованы в изданиях, входящих в перечень специализированных научных журналов, утвержденный МОН Украины; 1 – в издании, входящем в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ, а также индексируемом в базах данных РИНЦ (Россия), Academic Search Research & Development компании EBSCO Publishing (США), Periodicals Directory (США). Технические решения, полученные автором в процессе работы, закреплены в двух патентах Украины на полезные модели №75611 (опубл. 10.12.2012), № 88671 (опубл. 25.03.2014).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников из 138 позиций, словаря терминов, перечня условных обозначений и 8 приложений. Общий объем диссертации составляет 211 страниц машинописного текста и содержит 9 полных страниц с рисунками и таблицами, 14 страниц списка использованных источников, 51 страницу приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность проблемы, определены цели и задачи исследования, приведены научная новизна, достоверность и практическая значимость полученных результатов, перечислены решения, выносимые на защиту.

В первом разделе проведен анализ проблемы внедрения ТНУ в процесс теплогенерации, а также исследован тепловой потенциал шахтных вод Донбасса. В результате аналитических исследований сделан вывод, что наиболее важными факторами, влияющими на состав шахтных вод и их тепловой потенциал, являются глубина залегания и способ извлечения шахтных вод на поверхность, минералогический состав горных пород, омываемых шахтными водами и географическое расположение шахты. Температура шахтных вод Донбасса колеблется в пределах 15...27°C, а расход на отдельных горнодобывающих предприятиях достигает 884 м³/ч, из чего следует, что шахтные воды могут выступать эффективным низкопотенциальным источником теплоты.

Выполнен обзор известных способов использования теплоты шахтных вод и применения ТНУ в целом. Анализ проведенных ранее исследований показал, что использование теплоты шахтных вод до настоящего момента не получило широкого распространения, в том числе в силу эмпирического подхода к решению вопроса. Для проектирования и прогнозирования работы ТНУ, использующих теплоту шахтных вод, необходимо учитывать множество факторов, что также осложняется возможностью использования большого количества схем и рабочих тел.

Второй раздел посвящен теоретическому исследованию термодинамических потоков в ТНУ, использующей теплоту шахтных вод. В данном разделе разработана математическая модель потоков теплоты и эксергии в ТНУ, использующей теплоту шахтных вод. В работе исследованы три схемы ТНУ: традиционная, с переохладителем и с промежуточным теплообменником, циклы которых представлены на рис. 1.

С целью продления срока службы дорогостоящих элементов, в частности, таких как компрессор, целесообразно осуществлять цикл квазидвухступенчатого сжатия, в процессе которого часть жидкого ХА после прохождения всех имеющихся теплообменных поверхностей высокого давления (переохладителя и промежуточного теплообменника) перепускается непосредственно на вход компрессора, имеющий штуцер для впрыска жидкого ХА.

Автором предложено применить цикл квазидвухступенчатого сжатия хладагента в компрессоре ТНУ для повышения тепловой эффективности и долговечности работы установки. Наиболее иллюстративным в контексте применения КДС в качестве ХА является аммиак R 717, физические свойства которого обуславливают высокую температуру в конце сжатия (160°C) при температуре испарения 15°C и конденсации 60°C.

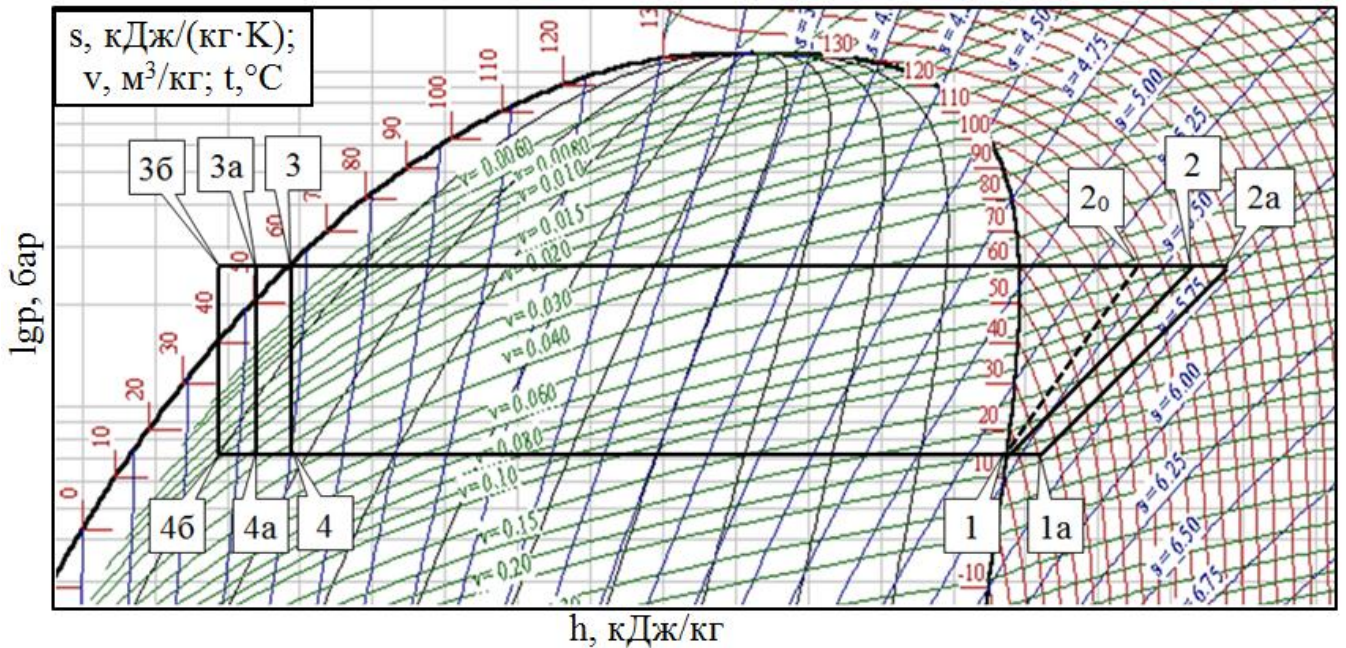


Рис. 1. Цикл теплонасосной установки с ХА аммиаком в h - I_{gr} координатах

При впрыске рассчитанного количества жидкого ХА давление в процессе сжатия падает до давления насыщения, после чего завершается работа сжатия хладагента. При этом цикл несущественно изменится (Рис. 2).

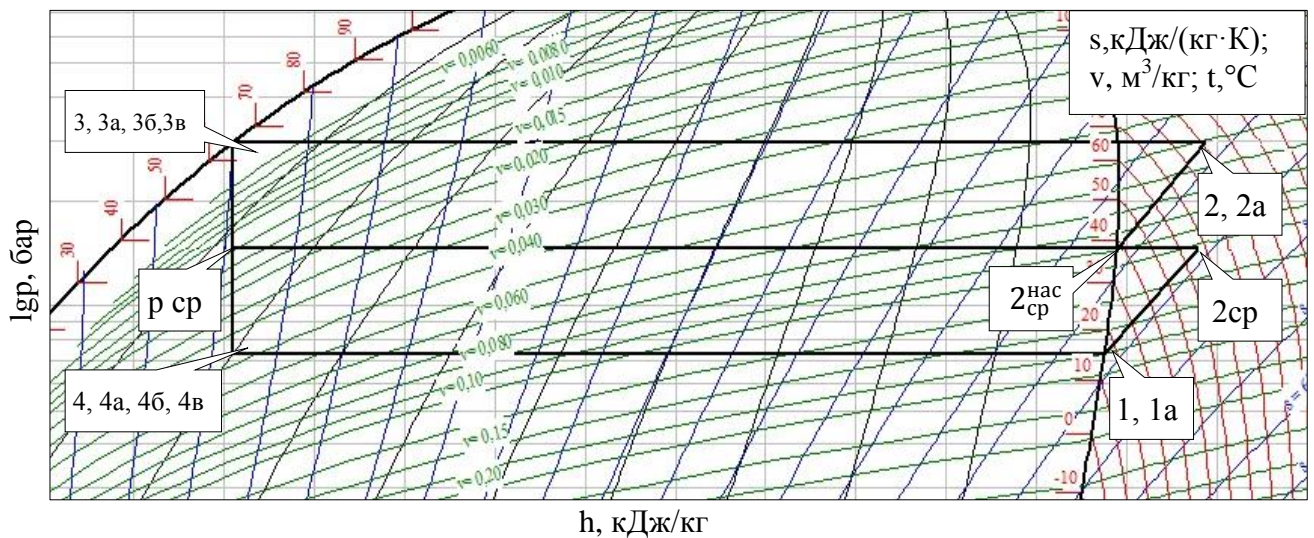


Рис. 2. Цикл с квазидвухступенчатым сжатием аммиака в h - I_{gr} координатах

В работе приведены схемы использования теплоты шахтной воды с помощью ТНУ с использованием в конструкции компрессора, позволяющего осуществить КДС в цикле установки (Рис. 3).

Распределение потоков теплоты и эксергии в схеме с переохладителем и промежуточным теплообменником в рамках рабочего контура ТНУ представлены на рисунках 4, 5.

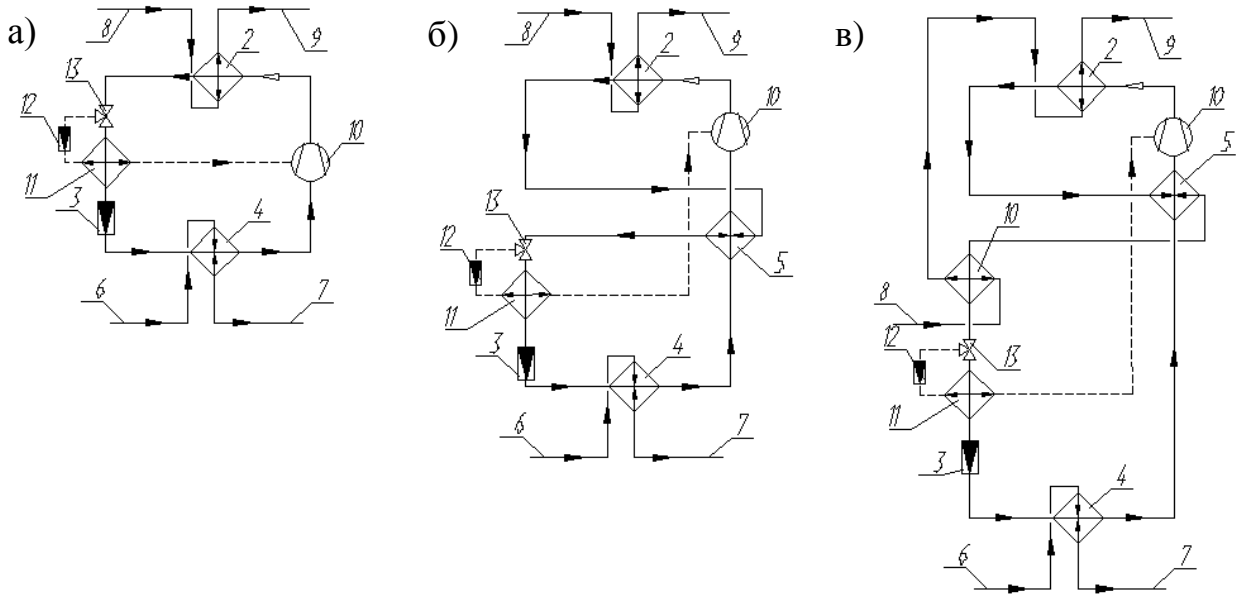


Рис. 3 – Схемы ТНУ с компрессором, осуществляющим впрыск жидкого ХА.

а – традиционная ТНУ; б – ТНУ с переохладителем, в – ТНУ с переохладителем и промежуточным теплообменником

1 – компрессор; 2 – конденсатор; 3 – дроссель; 4 – испаритель; 5 – промежуточный теплообменник; 6 – вход низкопотенциального теплоносителя в испаритель; 7 – выход низкопотенциального теплоносителя из испарителя; 8 – вход высокопотенциального теплоносителя из хозяйственного водопровода; 9 – выход высокопотенциального теплоносителя к потребителю; 10 – компрессор, осуществляющий впрыск жидкого ХА; 11 – теплообменник для подогрева жидкой фракции байпасируемого ХА; 12 – дроссель, регулирующий падение давления в байпасной линии; 13 – трёхходовой вентиль, регулирующий расход ХА на байпасную линию.

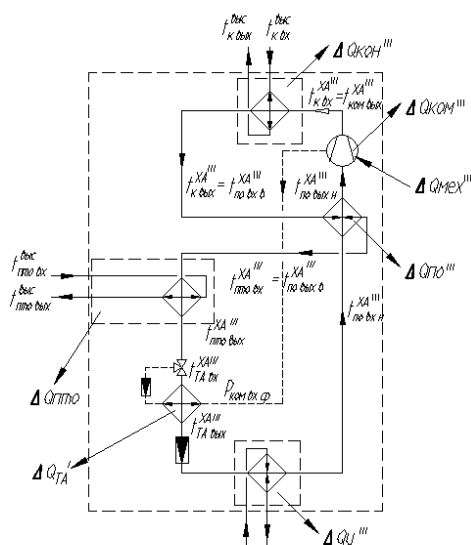


Рис. 4 Распределение потоков теплоты в ТНУ с переохладителем и промежуточным теплообменником

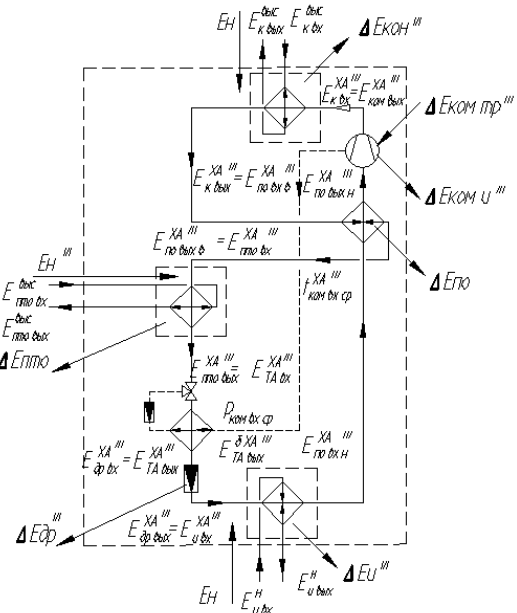


Рис. 5 Распределение потоков эксергии в ТНУ с переохладителем и промежуточным теплообменником

При этом базис усовершенствованной математической модели в виде полного теплового и эксергетического баланса для цикла ТНУ с переохладителем и промежуточным теплообменником с применением КДС запишутся в виде уравнений (1, 2)

$$Q_{и} - Q_{и}^{XA} - \Delta Q_{и} + Q_{мех} + Q_{ком} - Q_{ком}^{XA} - \Delta Q_{ком} + Q_{к}^{XA} + Q_{к}^B - \Delta Q_{к} + Q_{по н}^{XA} - Q_{по в}^{XA} - \Delta Q_{по} + Q_{пто}^{выс} - Q_{ком вх}^{XA} - Q_{пто}^{XA} - \Delta Q_{пто} = 0; \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \left(E_{и вх}^H - E_{и вых}^H + E_{и вх}^{XA} - E_{и вых}^{XA} - \Delta E_{и} \right) + \left(E_{ком вх}^{XA} - E_{ком вых}^{XA} + \Delta E_{ком тр} - \Delta E_{ком и} \right) + \\ & + \left(E_{к вх}^{XA} - E_{к вых}^{XA} + E_{к вх}^{выс} - E_{к вых}^{выс} - \Delta E_{к} \right) + \left(E_{по вх в}^{XA} - E_{по вых в}^{XA} + E_{по вх н}^{XA} - E_{по вых н}^{XA} - \Delta E_{по} \right) + \\ & + \left(E_{др вх}^{XA} - E_{др вых}^{XA} - \Delta E_{др} \right) + \left(E_{пто вх}^{выс} - E_{пто вых}^{выс} + E_{пто вх}^{XA} - E_{пто вых}^{XA} - \Delta E_{пто} \right) + E_{нас} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

где $Q_{и}$ – тепловая мощность испарителя, Вт; $Q_{и}^{XA}$ – тепловой поток ХА после испарителя; $\Delta Q_{и}$ – потери теплоты в испарителе, Вт; $Q_{мех}$ – теплота, подводимая в процессе сжатия к ХА за счет совершения механической работы, Вт; $Q_{ком}$ – тепловой поток, подводимый при сжатии, Вт; $Q_{ком}^{XA}$ – тепловой поток, отводимый из компрессора со сжатым ХА, Вт; $\Delta Q_{ком}$ – потери теплоты в компрессоре, Вт; $Q_{к}^{XA}$; $Q_{к}^B$ – теплота отводимая от ХА в процессе конденсации и подводимая к высокопотенциальному теплоносителю соответственно, Вт; $\Delta Q_{к}$ – потери теплоты в конденсаторе, Вт; $Q_{по н}^{XA}$; $Q_{по в}^{XA}$ – теплота, отводимая из переохладителя с ХА низкого и высокого давления соответственно, Вт; $\Delta Q_{по}$ – потери теплоты в переохладителе, Вт; $Q_{пто}^{выс}$ – теплота, получаемая высокопотенциальным ХА в ПТО, Вт; $Q_{ком вх}^{XA}$ – теплота, получаемая впрыскиваемым ХА, Вт; $Q_{пто}^{XA}$ – теплота, отдаваемая ХА в ПТО, Вт; $\Delta Q_{пто}$ – потери теплоты в ПТО, Вт; $E_{и вх}^H$; $E_{и вых}^H$; $E_{и вх}^{XA}$; $E_{и вых}^{XA}$ – эксергия шахтной воды и ХА соответственно на входе и выходе из испарителя, кДж; $\Delta E_{и}$ – потери эксергии в испарителе, кДж; $E_{ком вх}^{XA}$; $E_{ком вых}^{XA}$ – эксергия ХА на входе и выходе из компрессора соответственно, кДж; $\Delta E_{ком тр}$; $\Delta E_{ком и}$ – потери в компрессоре на трение и обусловленные индикаторным КПД соответственно, кДж; $E_{к вх}^{XA}$; $E_{к вых}^{XA}$; $E_{к вх}^{выс}$; $E_{к вых}^{выс}$ – эксергия ХА и высокопотенциального теплоносителя на входе и выходе из конденсатора соответственно, кДж; $\Delta E_{к}$ – потери эксергии в конденсаторе; $E_{по вх в}^{XA}$; $E_{по вых в}^{XA}$; $E_{по вх н}^{XA}$; $E_{по вых н}^{XA}$ – эксергия ХА высокого и низкого давления на входе и выходе из ПО соответственно, кДж; $\Delta E_{по}$ – потери эксергии в ПО, кДж; $E_{др вх}^{XA}$; $E_{др вых}^{XA}$ – эксергия ХА на входе и выходе из дросселя соответственно, кДж; $\Delta E_{др}$ – потери эксергии в дросселе, кДж; $E_{пто вх}^{выс}$; $E_{пто вых}^{выс}$; $E_{пто вх}^{XA}$; $E_{пто вых}^{XA}$ – эксергия высокопотенциального теплоносителя и ХА на входе и выходе из ПТО соответственно, кДж; $\Delta E_{пто}$ – потери эксергии в ПТО, кДж; $E_{нас}$ – эксергия, отдаваемая ХА в процессе КДС, кДж.

Для оценки полученных результатов были проведены расчетно-аналитические исследования зависимостей параметров ТНУ от температур в испарителе и конденсаторе, по результатам которых построены графики (Рис. 6-9).

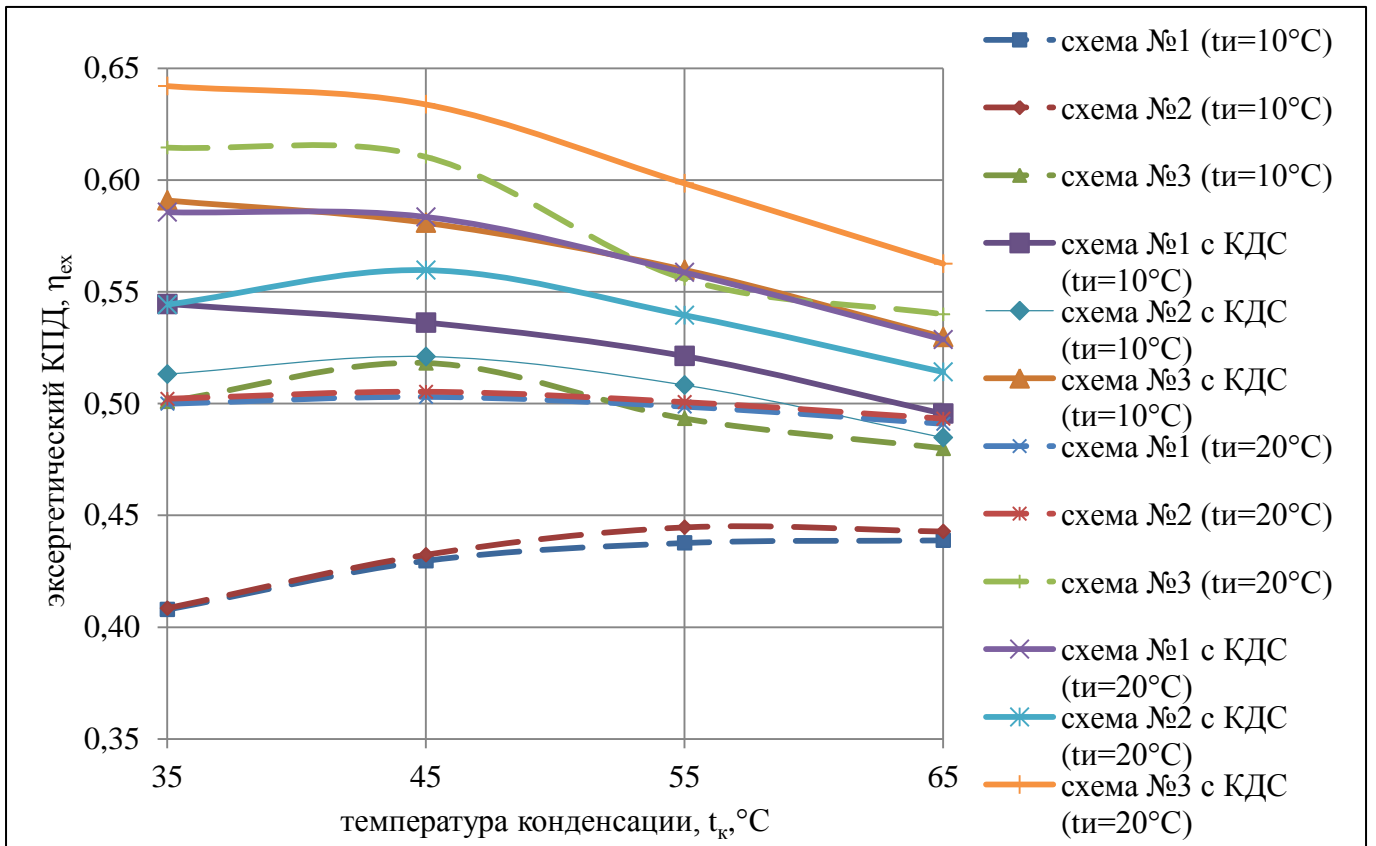


Рис. 6. Зависимость эксергетического КПД от температуры конденсации

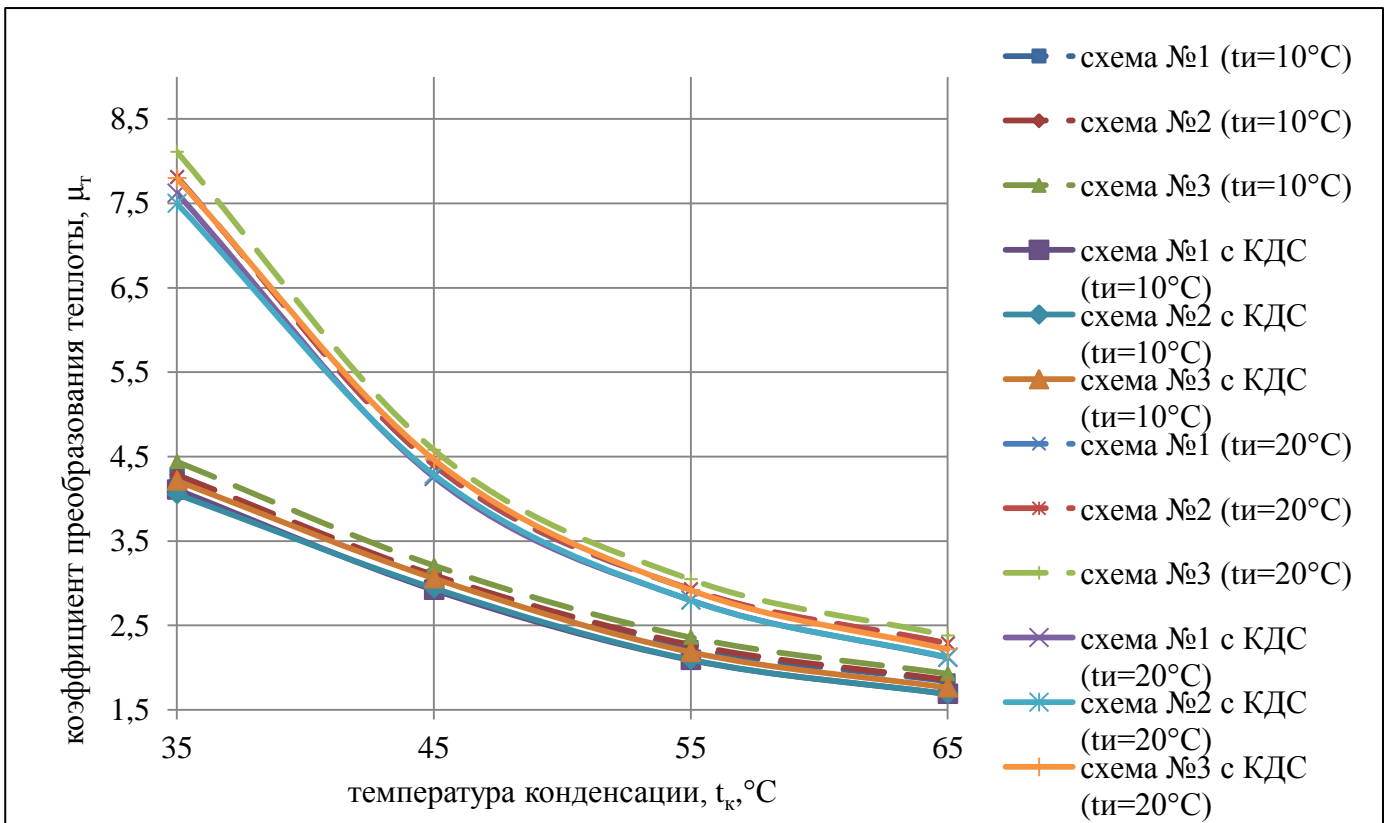


Рис. 7. Зависимость коэффициента преобразования теплоты от температуры конденсации

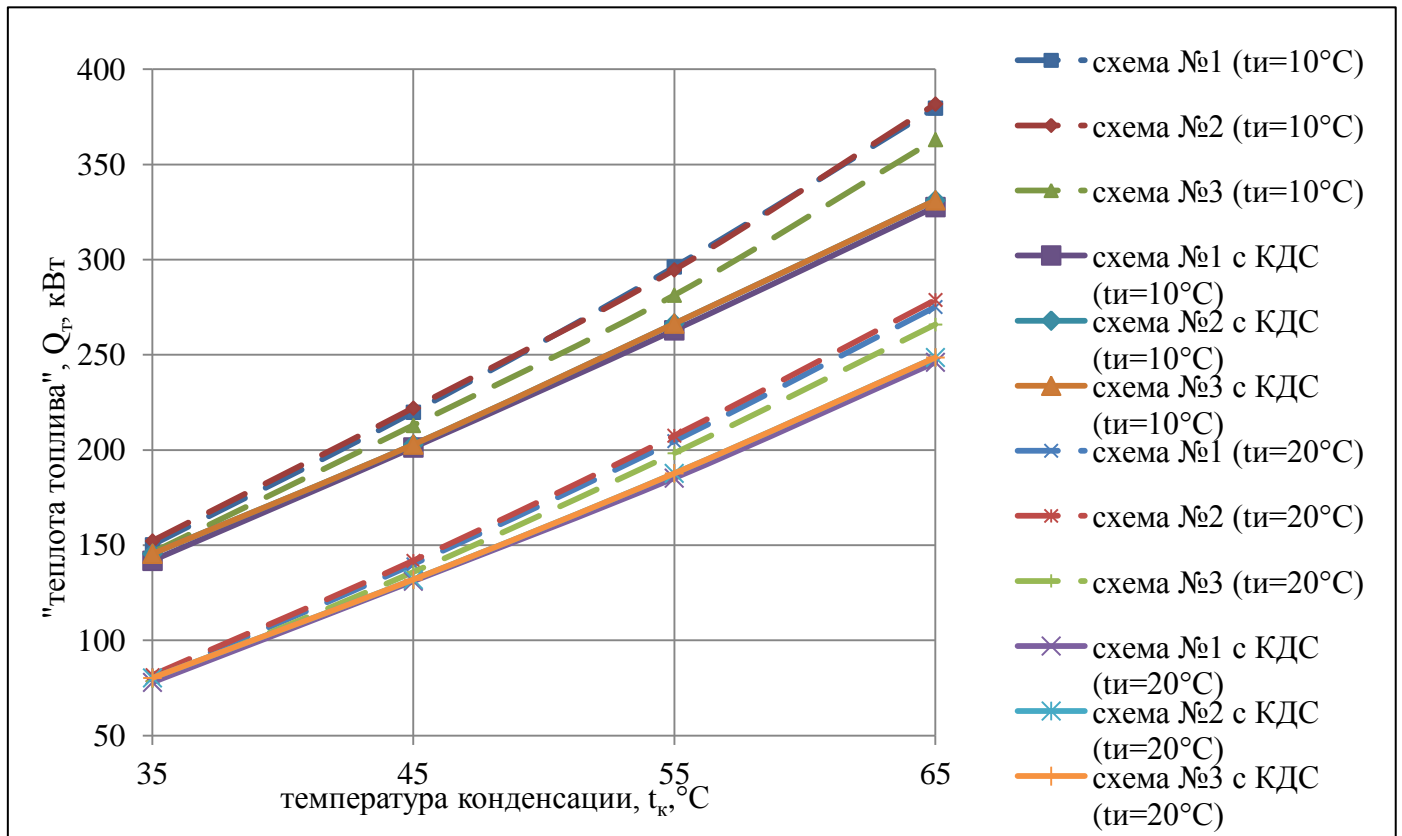


Рис. 8. Зависимость «теплоты топлива» от температуры конденсации

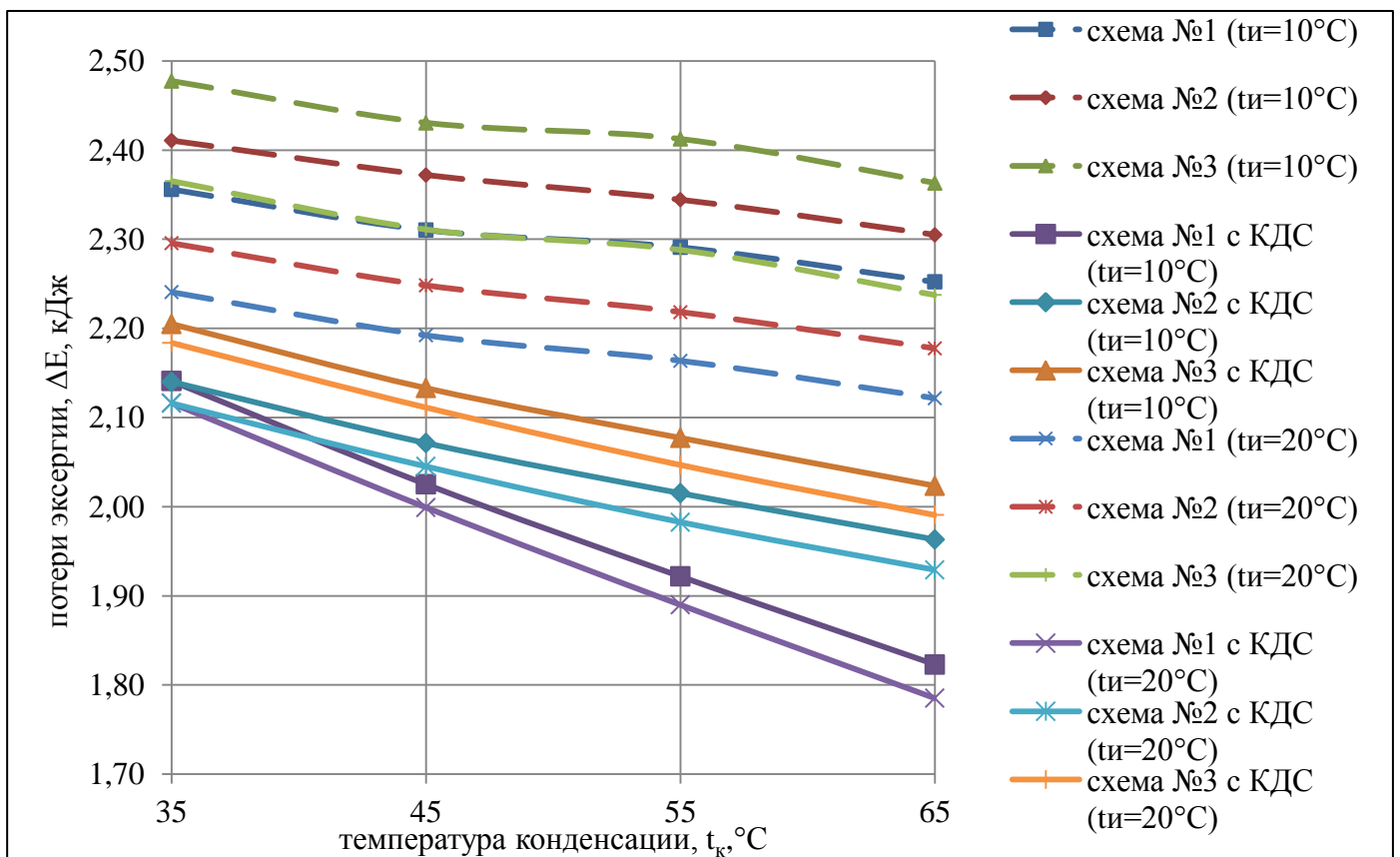


Рис. 9. Зависимость потерь эксергии от температуры конденсации

Анализ графических зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

- при постоянной «теплоте продукта» требуется меньшая «теплота топлива» при совершенствовании схемы ТНУ от традиционной до схемы ТНУ с ПО и ПТО (Рис. 8);

- коэффициент преобразования теплоты увеличивается по мере совершенствования схемы ТНУ, а эксергетический КПД увеличивается при использовании схемы ТНУ с ПТО (Рис. 6);

- при увеличении требуемой температуры высокопотенциального теплоносителя коэффициент преобразования теплоты уменьшается, но, как видно из графиков, лежит в пределах от 1,8 до 8,1 (Рис. 7);

- наиболее перспективным с точки зрения энергоэффективности является осуществление цикла с минимальным перепадом температур конденсации и испарения, поскольку в этом случае коэффициент преобразования теплоты будет максимальным (Рис. 7);

- для всех разработанных схем, для всех циклов и со всеми исследуемыми ХА эксергетический КПД лежит в пределах от 35% до 64% (Рис. 6);

- в случае осуществления цикла с КДС эксергетический КПД снижается на 8%, однако срок службы компрессора – основного узла ТНУ – существенно увеличивается, поскольку температура перегрева снижается более чем на 30% (Рис. 6);

- при увеличении температуры шахтной воды на 10°C коэффициент преобразования теплоты в среднем увеличивается на 40%, эксергетический КПД – в среднем на 16%, а «теплота топлива» снижается в среднем на 33%. Потери эксергии также снижаются за счет уменьшения температурного напора между испарителем и конденсатором (Рис. 6-9);

- вид ХА необходимо выбирать из условий экологической безопасности, а также, чтобы диапазон изменения энтальпий ХА в процессе испарения и конденсации был максимальным;

- предложенная в работе математическая модель может быть применена как для традиционных циклов ТНУ, так и для циклов с КДС, что наглядно иллюстрируется графиками зависимостей основных тепловых и эксергетических характеристик. Данные зависимости позволили создать методику оценки эффективности и расчета параметров конкретной ТНУ на этапе проектирования.

В третьем разделе изложен способ планирования и проведения эксперимента по выявлению наиболее рациональных режимов работы ТНУ. В качестве экспериментальной установки была выбрана геотермальная ТНУ – Thermia Diplomat Optimum G3 установленной тепловой мощностью 17,2 кВт (Рис. 10).

В ходе исследований было выделено три показателя, позволяющих оценить эффективность ТНУ: коэффициент преобразования теплоты, эксергетический КПД, экономическая эффективность от внедрения установки.

Определены следующие наиболее значимые влияющие факторы: температуры в конденсаторе и испарителе, обусловленные температурами высокопотенциального и низкопотенциального теплоносителей; температура высокопотенциального теплоносителя на входе, температура окружающей среды (поскольку их годовые колебания наиболее ощутимы при определении термодинамических параметров);

потери давления в контуре ХА (поскольку существенное падение давления ХА в процессе осуществления цикла может привести к его смещению в h -lgr – координатах).

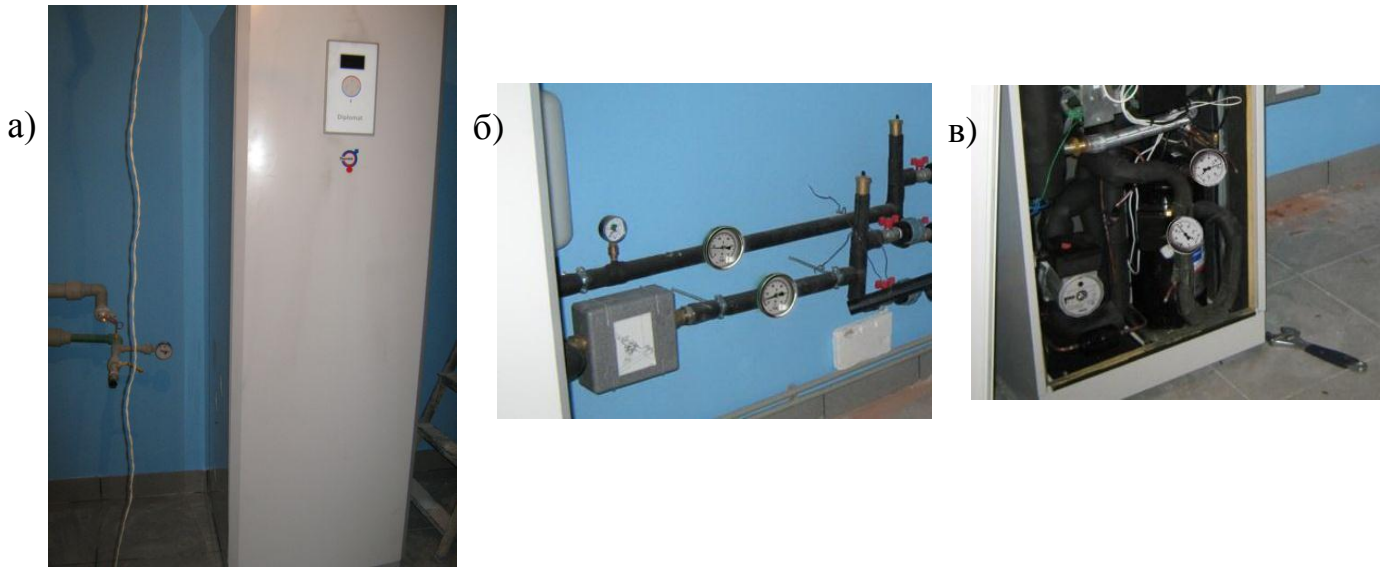


Рис. 10. Экспериментальная установка Thermia Diplomat Optimum G3
а) внешний вид; б), в) установка дополнительных термометров

Принципиальная схема теплоснабжения от ТНУ с изменениями, внесенными для проведения эксперимента, приведена на рис. 11.

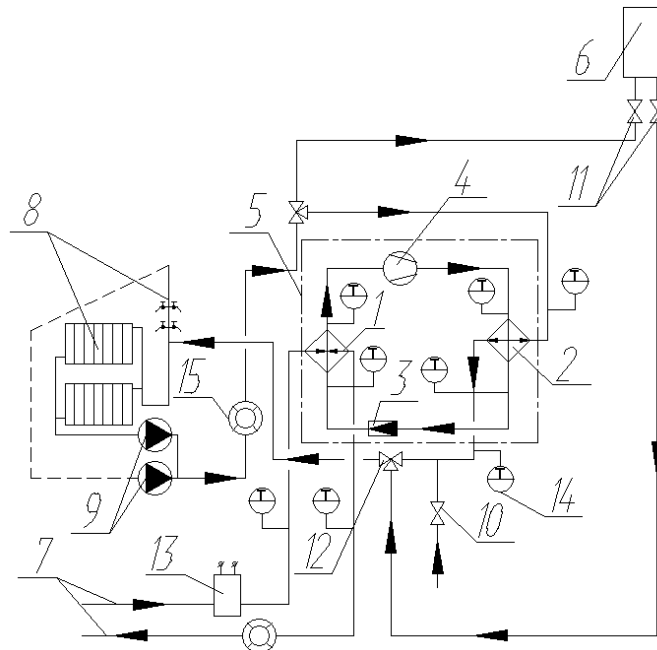


Рис. 11. Принципиальная схема теплоснабжения от экспериментальной ТНУ

1 – испаритель; 2 – конденсатор; 3 – дроссель; 4 – компрессор; 5 – границы ТНУ; 6 – пиковый (резервный) теплогенератор (электродкотел); 7 – подключение к низкопотенциальному источнику теплоты; 8 – потребители теплоты: система отопления и горячего водоснабжения (ГВС); 9 – циркуляционные насосы системы отопления и ГВС; 10 – вентиль наполнения (подпитки) контура высокопотенциального теплоносителя; 11, 12 – отключающая и регулировочная арматура; 13 – дополнительный подогреватель; 14 – термометры; 15 – счетчики воды.

При проведении эксперимента не учитывался химический состав и степень загрязнения взвешьями первичного теплоносителя, частота необходимых регенераций, поскольку при работе установки в нормальном режиме теплообменные поверхности можно считать чистыми.

Перед разработкой плана эксперимента были определены уровни варьирования факторов и выбраны их кодированные значения (табл. 1).

Таблица 1 - Уровни варьирования факторов эксперимента регрессионного анализа

Входные параметры факторов	Уровни факторов			Интервал варьирования
	Нижний -1	Основной (нулевой)	Верхний +1	
x_1 – температура в испарителе, $t_{и}, ^\circ\text{C}$	10	17,5	25	7,5
x_2 – температура в конденсаторе, $t_{к}, ^\circ\text{C}$	40	52,5	65	12,5
x_3 – потери давления в контуре ХА, Δp , Па	10	35	60	25
x_4 -температура высокопотенциального теплоносителя на входе в ТНУ, $t_{вп}, ^\circ\text{C}$	5	10	15	5
x_5 -температура окружающей среды, $t_{о.с.}, ^\circ\text{C}$	8	16,5	25	8,5

В качестве методов планирования эксперимента для получения зависимостей эксергетического КПД и коэффициента преобразования теплоты был использован дробный факторный эксперимент, поскольку в качестве условий было задано минимальное влияние факторов друг на друга.

Для получения зависимостей экономической эффективности, γ , были использованы методы ортогонального центрального композиционного планирования. В результате обработки экспериментальных данных и замены кодированных факторов натуральными значениями были получены следующие зависимости основных параметров, выделенных в результате усовершенствования математической модели потоков теплоты и эксергии в ТНУ: эксергетического КПД, коэффициента преобразования теплоты и эффективности.

$$y_{\eta_{ex}} = 2,7628 - 0,1367t_u - 0,04843 \cdot t_k - 0,05910 \cdot \Delta p + 2,7677 \cdot 10^{-3} \cdot t_u \cdot t_k - 6,2831 \cdot 10^{-5} \cdot t_u \cdot t_k \cdot \Delta p + -3,2986 \cdot 10^{-3} \cdot t_u \cdot \Delta p + 1,0995 \cdot 10^{-3} \cdot t_k \cdot \Delta p; \quad (3)$$

$$y_{\mu_r} = 18,0189 + 1,6278 \cdot t_u - 0,6009 \cdot t_k - 0,041 \cdot \Delta p - -0,02293 \cdot t_u \cdot t_k + 6,4006 \cdot 10^{-3} \cdot t_k^2; \quad (4)$$

$$y_{\gamma} = 8,0304 + 0,0742 \cdot t_u + 0,1565 \cdot t_k + 0,0213 \cdot \Delta p - -3,4987 \cdot 10^{-3} \cdot t_u^2 - 1,4906 \cdot 10^{-3} \cdot t_k^2 - 3,792 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta p^2. \quad (5)$$

Полученные уравнения регрессии были проверены на адекватность с помощью критерия Фишера и критерия Стьюдента. Адекватность полученных математических моделей подтверждается сравнением данных, рассчитанных аналитически, с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований. В силу того, что ТНУ, осуществляющая цикл с КДС, очень дорогостоящая и

сооружение ее для эксперимента затруднительно, а промышленные образцы данных ТНУ отсутствуют, приведен сравнительный анализ полученных математических зависимостей для традиционной схемы ТНУ. Поскольку адекватность данной схемы подтверждается экспериментальными данными (Рис. 12-14), можно говорить о справедливости данных зависимостей для всех схем, всех ХА, в том числе для цикла с КДС.

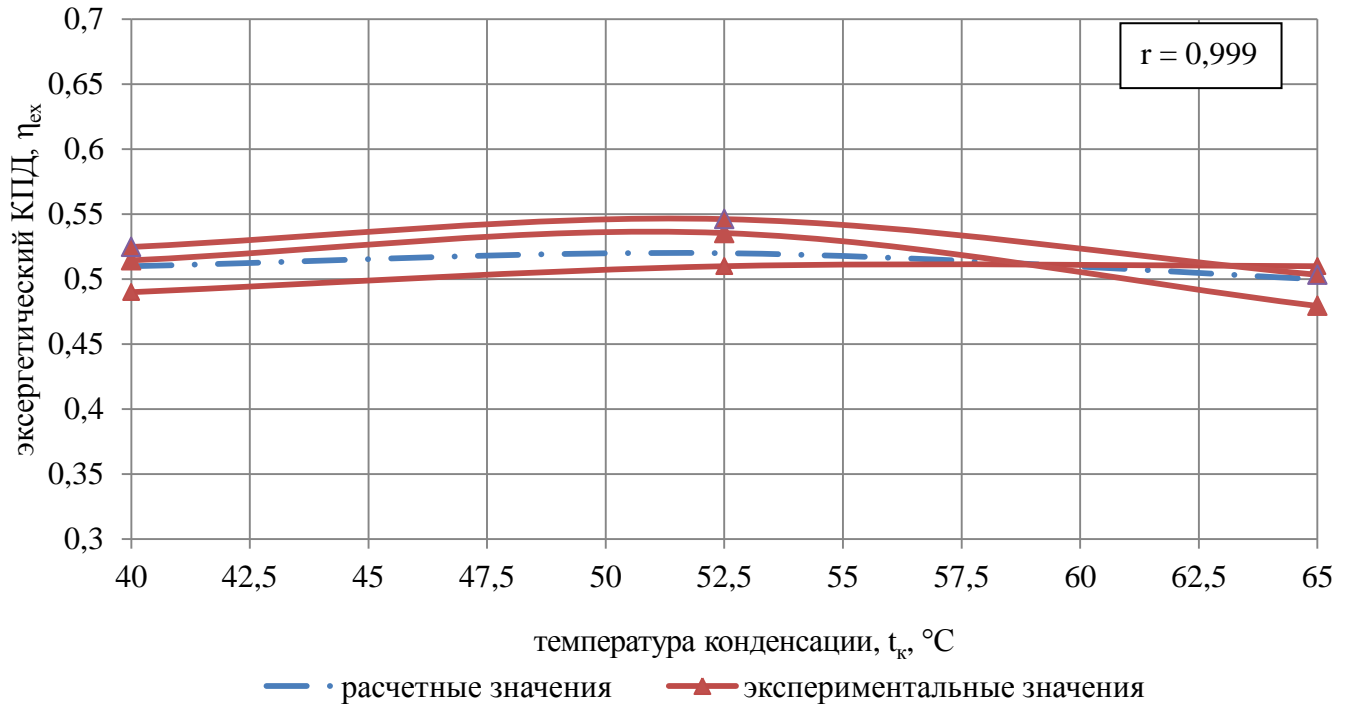


Рис. 12. Значения эксергетического КПД, определенные по расчетным и опытным данным

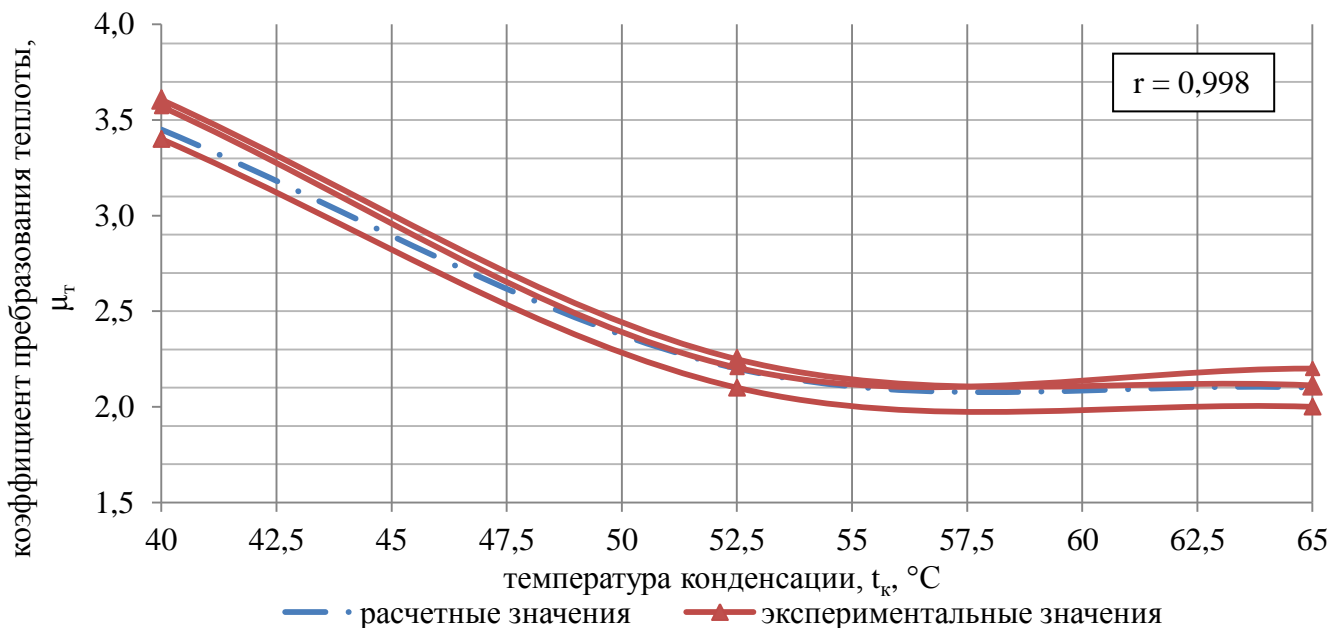


Рис. 13. Значения коэффициента преобразования теплоты, определенные по расчетным и опытным данным

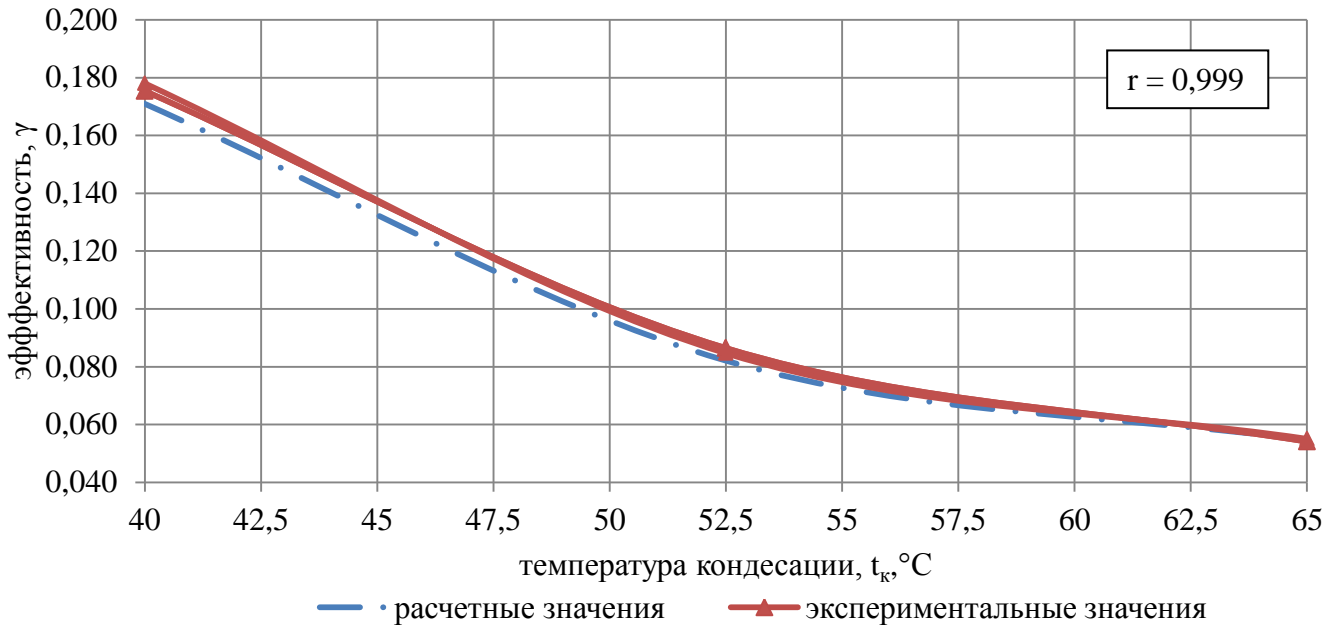


Рис. 14. Значения эффективности, определенные по расчетным и опытным данным

Зависимости, представленные на рис. 12-14, аппроксимируются следующими уравнениями

$$\eta_{\text{ex}} = (19,941 - 69,352 \cdot \ln(t_k) + 15,146 \cdot \ln(t_k)^3)^{-1}; \quad (6)$$

$$\mu = (12,926 + 4,902 \cdot \ln(t_k) - 0,0971 \cdot \ln(t_k)^3)^{-1}; \quad (7)$$

$$\gamma = (69,874 - 35,329 \cdot \ln(t_k) + 1,317 \cdot \ln(t_k)^3)^{-1}. \quad (8)$$

В результате проведенных экспериментальных исследований и анализа уравнений (3-5) можно сделать следующие выводы:

- для уменьшения эксергетических потерь в ТНУ необходимо стремиться к более высокой температуре в испарителе за счет теплоизоляции подающих трубопроводов шахтной (или другой технической) воды и минимальным потерям давления ХА при циркуляции по контуру ТНУ, что достигается при помощи, расчетно-аналитического выбора оборудования ТНУ с обоснованным диапазоном компрессора по давлению;

- отклонения расчетных значений эксергетического КПД, коэффициента преобразования и эффективности ТНУ от экспериментальных значений не превышают допустимых пределов;

- для увеличения коэффициента преобразования теплоты необходимо развивать площади поверхностей теплообмена в испарителе и конденсаторе, а также использовать дополнительные поверхности теплообмена;

- изменение основных показателей ТНУ для всей серии опытов имеет сходную тенденцию.

Максимальные значения исследуемых параметров приходятся на циклы с минимальной затраченной работой. Увеличение показателей происходит с уменьшением температуры высокопотенциального теплоносителя и увеличением температуры низкопотенциального.

В четвертом разделе диссертационной работы предложена методика и программа по расчету ТНУ, использующей теплоту шахтных вод. По результатам проведенных численных и практических экспериментов была составлена блок-схема алгоритма выбора оборудования ТНУ.

На начальном этапе, после принятия решения об использовании ТНУ для утилизации теплоты шахтных вод, необходимо произвести сбор данных для анализа теплового потенциала и свойств как низкопотенциального теплоносителя, так и высокопотенциального теплоносителя:

- температура и расход низкопотенциального теплоносителя;
- наличие механических примесей в низкопотенциальном теплоносителе;
- химический состав, рН среды шахтных вод;
- возможные сферы применения теплоты высокопотенциального теплоносителя (системы отопления, горячего водоснабжения, низкотемпературные системы «теплый пол»);
- требуемый расход и температура высокопотенциального теплоносителя.

Затем выбирается в диапазоне требуемых температур несколько наиболее целесообразных ХА. Для этих ХА производится расчет по приведенной методике с использованием формул для всех трех схем подключения ТНУ, расчет завершается вычислением технико-экономических показателей. По значениям экономических показателей (размеру капиталовложений, сроку окупаемости) делается вывод о целесообразности применения той или иной схемы ТНУ.

Для оценки эффективности инвестиций была разработана опытно-промышленная ТНУ, использующая теплоту шахтных вод шахты «Северная» п. Кирово г. Дзержинска для нужд теплоснабжения части прилегающего квартала. В качестве потребителей теплоты от котельной выступают 22 жилых дома, 1 детский сад, 1 школа, дом культуры.

В качестве источника низкопотенциальной теплоты используются шахтные воды с температурой воды 22...26°C и расходом 120 м³/час. Потребители также обеспечиваются пиковым источником догрева теплоносителя. Для этого проектом предусмотрена установка в котельной котлов КСВа-1,25 в количестве 3 шт. Также предусматривается установка ТНУ общей тепловой мощностью 3,4 МВт. Прибыль, получаемая от реализации проекта, состоит в основном из средств, высвобождаемых при экономии энергоресурсов в процессе эксплуатации ТНУ, использующей теплоту шахтной воды.

Основные финансовые показатели рассматриваемого проекта и движение денежных средств проиллюстрированы на рис. 15, 16.

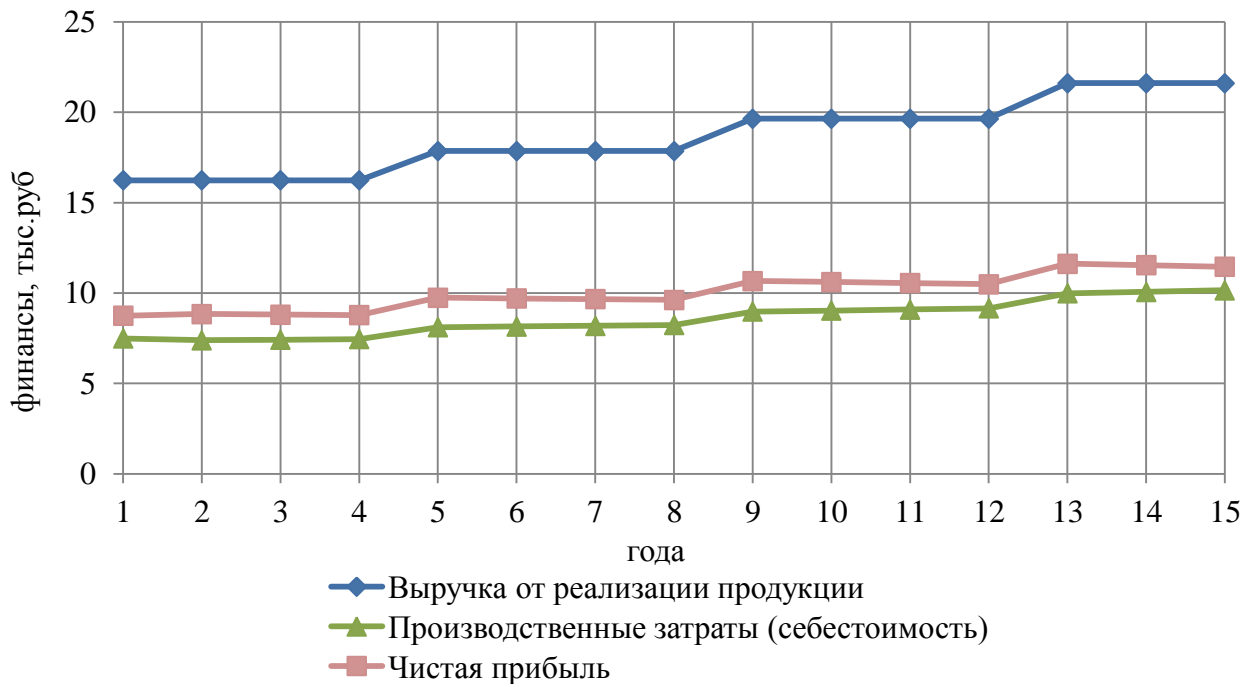


Рис. 15. Основные финансовые показатели применения ТНУ

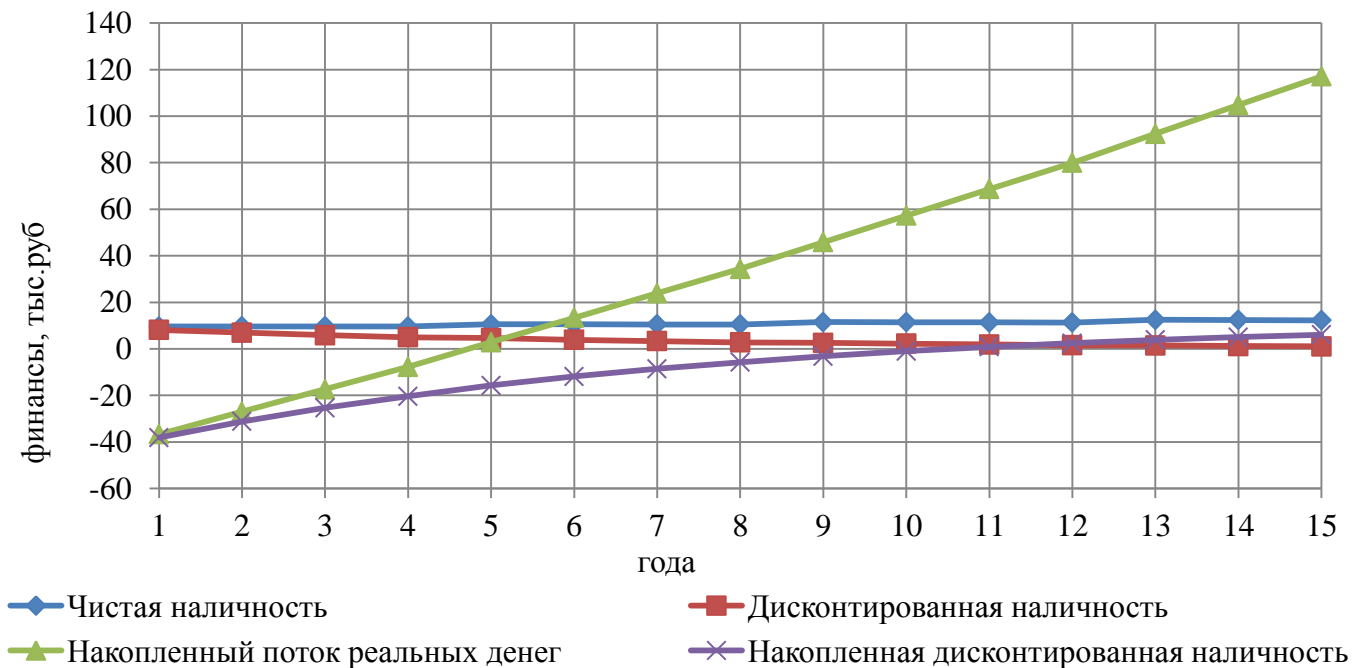


Рис. 16. Движение денежных средств

При дисконтированном периоде окупаемости 11 лет чистый дисконтированный доход составит 9483,73 тыс. руб. на 15-тый год эксплуатации оборудования. В данном случае индекс рентабельности инвестиций составит 1,20, а внутренняя норма доходности 20,71%.

Рассчитаны два основных направления экономии при использовании теплоты шахтных вод: за счет применения цикла с КДС, а также за счет снижения нагрузки на теплогенераторы, использующие первичные энергоресурсы. В результате расчетов экономия от увеличения времени эксплуатации компрессора и теплогенераторов составит 454,86 тыс. руб. Ежегодная экономия природных топливно-энергетических ресурсов при эксплуатации ТНУ, использующей теплоту шахтных вод, эквивалентна 1947 т угля Донецкого бассейна или 1,5 млн м³ природного газа.

Для оценки экологического эффекта в работе был произведен расчет предотвращенного выброса для разрабатываемой установки в п. Кирово г. Дзержинска. Количество вредных и загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы сократится приблизительно на 70%, что будет способствовать улучшению экологической обстановки в регионе.

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена прикладная научно-техническая задача по повышению эффективности парокompрессионной ТНУ, использующей теплоту шахтных вод. Решение достигается предложенными, на основе расчетно-аналитических и экспериментальных исследований, - способом осуществления цикла ТНУ с квазидвухступенчатым сжатием и схемами установок, которые учитывают особенности утилизации теплоты вод шахтного водоотлива.

1. В результате проведенных исследований шахтных вод Донбасса доказано, что использование теплоты шахтной воды в качестве низкотемпературного теплоносителя для ТНУ является перспективным направлением, так как их температура колеблется в пределах 15...27°C, а расход достигает 884 м³/ч.

2. Усовершенствована математическая модель потоков теплоты и эксергии в ТНУ, использующей теплоту шахтной воды, в том числе при осуществлении цикла с КДС для различных схем ТНУ. Использование схемы с переохладителем и промежуточным теплообменником позволяет значительно увеличить термический КПД, коэффициент преобразования теплоты на 16%, эксергетический КПД на 35%. Необходимая «теплота топлива» при этом уменьшается на 23%.

3. Наиболее эффективной является схема с переохладителем и промежуточным теплообменником. При исследовании режимов работы ТНУ в системах теплоснабжения, требующих высокой температуры высокопотенциального теплоносителя (до 65°C), доказана целесообразность применения цикла с КДС. В случае осуществления такого цикла температура перегрева в конце сжатия снижается в среднем на 30%, что позволяет продлить службы компрессора – основного узла ТНУ.

4. Разработана методика расчета ТНУ, использующей теплоту шахтных вод, позволяющая учесть энергетический потенциал источника теплоты, подобрать тип ХА, вариант схемы установки и обосновать необходимость применения цикла с КДС.

5. Разработана и внедрена опытно-промышленная схема ТНУ для вод шахтного водоотлива шахт «Северная» г. Дзержинска. Установка работает по бивалентной схеме, т.е. с пиковым догревателем.

6. Предложен алгоритм экономической оценки эффективности ТНУ, использующей теплоту шахтной воды и программа для расчета эффективности циклов ТНУ, в том числе с КДС. Чистый дисконтированный доход от внедрения ТНУ, использующей теплоту шахтной воды, в г. Дзержинске составил 9483,73 руб. при дисконтированном периоде окупаемости 11 лет, что говорит о прибыльности и целесообразности внедрения в производство данной технологии. Экономия при использовании цикла с КДС по сравнению с традиционным циклом ТНУ будет составлять 94,6 тыс. руб. за счет увеличения срока службы компрессоров. Общая экономия денежных средств при использовании в качестве источника теплоты шахтной воды в г. Дзержинске составит 454,86 тыс. руб. в год.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

– публикации в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН Украины:

1. Лукьянов А.В. Шахтні води як джерело теплоти для систем теплопостачання / А.В. Лукьянов, С.И. Монах, **Д.В. Выборнов** [Текст] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, «Инженерные системы и техногенная безопасность». - 2010 - №6 (68). – Макеевка, С. 90-95. *(Выполнен анализ состояния топливно-энергетического сектора, показана необходимость внедрения тепловых насосов).*

2. **Выборнов Д.В.** Шахтний водовідлив – джерело теплової енергії / Д.В. Выборнов [Текст] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, «Инженерные системы и техногенная безопасность». - 2011 - №5 (91). – Макеевка, С. 98-105.

3. Горожанкин С.А. Техническая и ресурсная составляющая процесса энергоресурсосбережения в Украине / С.А. Горожанкин, **Д.В. Выборнов**, С.И. Монах [Текст] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, «Инженерные системы и техногенная безопасность». - 2012 - №2 (94). – Макеевка, С. 3-8. *(Сделан детальный обзор применяющихся в Украине способов тепло- и электрогенерации. Выдвинуты предложения по более широкому использованию вторичных и альтернативных источников теплоты).*

4. Монах С.И. Утилизация теплоты шахтных вод для нужд автономного теплоснабжения / С.И. Монах, **Д.В. Выборнов** // Науковий вісник будівництва, вип.72, Харків, ХНУБА ХОТВ АБУ, - 2013. – С.305-309. *(Рассмотрена возможность реструктуризации теплогенерационного сектора хозяйства с использованием теплоты шахтных вод в пароконденсационных ТНУ).*

5. **Выборнов Д.В.** Исследование термодинамического цикла работы пароконденсационного теплового насоса, использующего теплоту шахтной воды / Д.В. Выборнов, С.И. Монах // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, «Инженерные системы и техногенная безопасность» № 5 (103), Макеевка. – 2013. – С. 60-67. *(Выполнен термодинамический анализ*

работы парокompрессионной ТНУ, произведена оценка температурных и энергетических потенциалов в процессе цикла).

6. Выборнов Д.В. Математическое моделирование тепловых потоков в теплонасосной установке, осуществляющей цикл квазидвухступенчатого сжатия с промежуточными теплообменными поверхностями / Выборнов Д. В., Монах С. И. // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, «Научно-методическое и практическое обеспечение градостроительства, территориального и стратегического планирования» № 3 (107), Макеевка. – 2014. – С. 7-12. *(Проведен анализ тепловых потоков и потоков эксергии в ТНУ, утилизирующей теплоту шахтных вод. Предложено применение цикла ТНУ с квазидвухступенчатым сжатием, получены математические зависимости, описывающие потоки теплоты и эксергии).*

7. Выборнов Д.В. Результати експериментально-аналітичних досліджень ефективності роботи теплонасосних установок / Д. В. Выборнов, С. И. Монах // Холодильная техника и технология, №6 (152), Одесса. – 2014. – С. 26-31. *(Предлагаются зависимости, описывающие эффективность работы ТНУ, полученные экспериментальным путем в результате планирования эксперимента.).*

8. Выборнов Д.В. Экономическая и экологическая эффективность ТНУ, использующих теплоту шахтных вод / Д.В. Выборнов, С.И. Монах // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, «Инженерные системы и техногенная безопасность» № 5 (115), Макеевка. – 2015. С. 43-48. *(Выполнен анализ работы парокompрессионной ТНУ, использующей теплоту шахтной воды для нужд теплоснабжения, с экономической и экологической точек зрения).*

– публикации в рецензируемых периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

9. Горожанкин С.А. Тепловая схема источника теплоснабжения с теплонасосной установкой (ТНУ) на шахтной воде / С. А. Горожанкин, С. И. Монах, **Д.В. Выборнов** // Вестник АГТУ, №2 (56), Астрахань, - 2013. – С. 15-20. *(Предложена схема внедрения теплонасосных установок, в частности, для систем теплоснабжения на шахтах для обеспечения потребности в горячем водоснабжении).*

– патенты:

10. Патент Украины на полезную модель №75611 «Система теплоснабжения» F24D 15/04; F24D 17/02. Сдан 07.05.2012.опубл. 10.12.2012, Бюл. № 23.

11. Патент Украины на полезную модель № 88671 «Парокompрессионная теплонасосная установка» F24D 15/04. Сдан 28.10.2013. опубл. 25.03.2014, Бюл. № 6.

– публікації в інших виданнях:

12. **Выборнов Д.В.** Шахтный водоотлив как источник тепловой энергии / Д.В. Выборнов // IV Международная конференция молодых ученых «Geodesy, architecture & construction», Львов. – 2012. – С.146-149.

13. **Выборнов Д.В.** Энергосбережение как ключевое понятие в системах теплоснабжения / Д.В. Выборнов Сборник тезисов докладов III Международной конференции «Науково-технічне та організаційно-економічне сприяння реформам у будівництві та ЖКГ», Макеевка. – 2012. – С.119-122.

14. **Выборнов Д.В.** Влияние параметров термодинамического цикла парокompрессионной теплонасосной установки (ТНУ) на ее эффективность / Д.В. Выборнов, С.И. Монах // «Строительство-2013», Проблемы и перспективы развития современных инженерно-экологических систем. Материалы международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону. – 2013. – С.175-176.

15. **Выборнов Д.В.** Покрытие отопительной тепловой нагрузки за счет теплоты шахтных вод / Д.В. Выборнов // Материалы двадцатой всеукраинской научно-практической конференции «Інноваційний потенціал світової науки - ХХІ сторіччя», Запорожье. – 2013 г. С. 104-105.

16. Олексюк А.А. Аналіз шляхів енергетичного розвитку України : монографія / А.А. Олексюк, З.В. Удовиченко, **Д.В. Выборнов.** - Макеевка: ДонНАСА, 2011. – 118 с. (рассмотрены вопросы энергосбережения в системах теплоснабжения).

АННОТАЦИЯ

Выборнов Д.В. Использование теплоты шахтных вод с помощью парокompрессионных теплонасосных установок.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.03 - теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение. Донбасская национальная академия строительства и архитектуры. Макеевка, 2016.

Диссертационная работа посвящена вопросу утилизации бросовой теплоты шахтных вод в системах теплоснабжения путем использования парокompрессионных теплонасосных установок.

В работе выполнен анализ существующих систем утилизации теплоты с помощью теплонасосных технологий. Проведен детальный анализ теплового потенциала шахтных вод, в результате которого можно сделать вывод, что данный низкопотенциальный теплоноситель может выступать в роли источника теплоты для систем теплоснабжения при правильном выборе хладагента, а также при рациональной организации схемы включения ТНУ в систему теплоснабжения.

Особого внимания заслуживает использование квазидвухступенчатого сжатия в циклах ТНУ, позволяющего продлить срок службы компрессора путем уменьшения температуры в конце сжатия. Разработаны методические рекомендации по выбору схемы ТНУ в зависимости от теплового потенциала производственных стоков, вида тепловой нагрузки и типа ХА. Определен экономический и экологический эффект от внедрения ТНУ, использующих теплоту шахтных вод.

Разработана математическая модель потоков теплоты и эксергии в рабочих контурах ТНУ различных схем, в том числе и для схем с КДС. Получены уравнения теплового и эксергетического баланса для различных схем ТНУ, которые позволяют оценить потери теплоты и эксергии в различных узлах установки. Разработана методика расчета ТНУ с учетом параметров как высокопотенциального, так и низкопотенциального теплоносителя, а также с учетом свойств ХА.

Проанализировано влияние изменения температур теплоносителей на параметры работы установки. Установлены определяющие показатели, которые объективно характеризуют работу ТНУ (коэффициент преобразования теплоты, эксергетический КПД, экономическая эффективность).

Изложена методика и план проведения экспериментальных исследований. Адекватность полученной математической модели доказана опытным путем на действующей ТНУ. Разработаны рекомендации по выбору оптимальной схемы ТНУ для каждого конкретного случая использования предложенной установки.

Результаты технико-экономического расчета внедрения ТНУ, использующих теплоту шахтных вод, на конкретном примере подтверждают рентабельность данного рода инвестиций. Доказан положительный экологический эффект от предотвращенного выброса при сжигании углеводородного топлива.

Ключевые слова: шахтные воды, парокompрессионная теплонасосная установка, квазидвухступенчатое сжатие, теплоноситель, хладагент, рабочий контур, потоки теплоты и эксергии, теплоснабжение, коэффициент преобразования теплоты, эксергетический КПД, экономическая эффективность, энергоресурсосбережение.

АНОТАЦІЯ

Виборнов Д.В. Використання теплоти шахтних вод за допомогою парокompресійних теплонасосних установок.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.03 - теплопостачання, вентиляція, кондиціонування повітря, газопостачання та освітлення. Донбаська національна академія будівництва і архітектури. Макіївка, 2016.

Дисертаційна робота присвячена питанню утилізації скидної теплоти шахтних вод у системах теплопостачання шляхом застосування парокompресійних теплонасосних установок.

Розроблено математичну модель потоків теплоти і эксергії в робочих контурах ТНУ різних схем, у тому числі, і для схем з квазидвоступінчатим стисканням. Встановлено визначні показники, які об'єктивно характеризують роботу ТНУ: коефіцієнт перетворення теплоти, эксергетичний ККД, економічна ефективність.

Адекватність отриманої математичної моделі доведена дослідним шляхом на діючій ТНУ. Розроблено рекомендації щодо вибору оптимальної схеми ТНУ для кожного конкретного випадку використання запропонованої установки.

Результати техніко-економічного розрахунку впровадження ТНУ, що використовують теплоту шахтних вод, підтверджують рентабельність інвестицій. Доведений позитивний екологічний ефект.

Ключові слова: шахтні води, парокompресійна теплонасосна установка, квазідвоступінчате стискання, холодоагент, робочий контур, потоки теплоти і ексергії, коефіцієнт перетворення теплоти, ексергетичний ККД, економічна ефективність, енергоресурсозбереження.

ABSTRACT

D. Vybornov. Using of heating of mining waters with the help of steam compressed heat pump systems.

Ph.D. thesis in Engineering sciences within the specialty with a course code 05.23.03 – heat supply, ventilation, air-conditioning, gas supply and lighting.

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka, 2016.

The thesis is devoted to the issues of utilization of exhaust heat of mining waters in heat supply systems by using of compression steaming heat pump systems.

The mathematical model of heat flow and exergy of pressure circuits of heat pump systems of different schemes, including circuits with quasi two-step compression was designed.

The designated indicators which characterize objectively the functioning of heat pump systems were defined: index of heat conversion, degree of efficiency, economy effectiveness.

Appropriateness of received mathematical model is approved experimentally with acting heat pump system. Recommendations for choosing of optimum configuration of heat pump system for every concrete case of using the proposed system.

Results of technical and economic calculation of implementation of heat pump systems which use the heat of mining waters confirm the investment profitability. The positive ecological effect was approved.

Key words: mining water, steam compressed heat pump systems, quasi two-step compression, refrigerant, pressure circuit, heat flow and exergy, index of heat conversion, degree of efficiency, economy effectiveness, energy and resource saving.