

На правах рукописи



Закирова Ильмира Асхатовна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ
ТОНКОПЛЕНОЧНЫМ ПОКРЫТИЕМ ТЕПЛОЙ ИЗОЛЯЦИИ
ТРУБОПРОВОДОВ**

05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» на кафедре «Тепловые электрические станции»

Научный руководитель: доктор химических наук, профессор
Чичирова Наталия Дмитриевна

Официальные оппоненты: **Рыженков Артем Вячеславович**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", доцент кафедры «Промышленные теплоэнергетические системы»

Кадыров Айдар Ильдусович, кандидат технических наук, Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», Институт энергетики и перспективных технологий, заведующий лабораторией теплофизики и волновых технологий

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «04» июня 2019 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д212.082.06 при ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, ауд. Д-225, тел./факс (843) 527-92-02).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.082.06.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного энергетического университета и на официальном сайте КГЭУ <https://kgeu.ru/Diss/Dissertant/273?idDiss=91>.

Автореферат разослан «...» 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Зиганшин Шамиль Гаязович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Важным условием развития энергетики страны в современном мире является развитие распределенной энергетики. Все более значимым становится влияние факторов, способствующих достижению экономии топлива при производстве и распределении энергии, а также снижение выбросов в окружающую среду, что позволит повысить эффективность функционирования объектов распределенной энергетики – энерготехнологических комплексов (ЭТК). Актуальной и важной задачей для энергетических систем страны в целом является повышение надежности систем теплоснабжения (СТС), входящих в состав ЭТК. Российская СТС является самой большой в мире и состоит примерно из 50 тыс. локальных систем теплоснабжения, обслуживаемых 17 тыс. предприятий теплоснабжения.

Одной из проблем, влияющей на повышение потерь тепловой энергии при транспортировке, является неудовлетворительное состояние тепловой изоляции трубопроводов и оборудования СТС. Некачественная изоляция является косвенной причиной коррозионных процессов, приводящих к повреждениям трубных и теплообменных поверхностей с последующим образованием свищей и потерей теплоносителя.

На данный момент, в качестве тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей, а также в тепловых камерах после реконструкции и капитального ремонта, используются изделия на основе минерального волокна с защитным покрытием из стеклопластика или стеклоткани. В процессе эксплуатации волокнистая изоляция трубопроводов подвержена разрушению и потере теплозащитных свойств, что приводит к значительным потерям теплоты при ее транспортировке.

В связи с этим разработка новых и модернизация существующих конструкций теплоизоляции для снижения потерь тепловой энергии при ее передаче, а также повышение надежности существующей волокнистой тепловой изоляции трубопроводов СТС является актуальной задачей.

Одним из способов повышения надежности существующей изоляции является нанесение на покровный слой дополнительного тонкопленочного покрытия (ТПП). Однако данные о физико-технических и тепловых характеристиках ТПП в общей структуре изоляции в литературе отсутствуют. Также нет данных об изменении состояния в процессе эксплуатации основного и покровного слоев тепловой изоляции и влияния ТПП после нанесения на общую картину тепловых процессов, протекающих в толще теплоизоляционной конструкции, в зависимости от исходного состояния основного и покровного слоев. В связи с этим, исследование тепловых характеристик теплоизоляционной конструкции с ТПП и теплообменных процессов, протекающих в такой многослойной изоляции, является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиями в области функционирования энерготехнологических комплексов, как объектов распределенной энергетики, занимались В.М. Батенин, В.М. Масленников, Ю.Г. Назмеев, А.Я. Шелгинский и др.

За рубежом вопросам конвективного тепло- и массопереноса в пористых средах посвящено большое количество монографических работ и статей. Среди них стоит отметить научные исследования D.A. Nield, A. Bejan, P. Vasseur, K. Khanafer, A. Al-Amiri, I. Pop, J.-P. Caltagirone, Y.-F. Rao, Y. Miki, K. Fukuda, Y. Takata, M. Kumari, M. C. Charrier-Mojtabi, S.A. Khashan, G. Nath и др.

Изучением вопросов конвективного теплообмена в пористых средах различной конфигурации занимались исследователи А. Жукаускас, В.А. Брайловская, Р.А. Садыков, Т.А. Трифонова, М.А. Шеремет, Р.Р. Сираев и т.д.

Вопросами анализа состояния проблемы повышения эффективности эксплуатирующихся трубопроводов СТС и потерями через теплоизоляционные конструкции трубопроводов при передаче тепловой энергии занимались исследователи И.А. Башмаков, В.В. Гурьев, В.В. Бухмиров, Ю.В. Ваньков, В.С. Слепченко, В.Г. Хромченко, Г.В. Кузнецов, В.Ю. Половников, Б.М. Шойхет, Л.В. Ставрицкая, Г.Х. Умеркин, С.А. Байбаков и др.

Исследования о целесообразности применения ТПП в качестве тепловой изоляции проводились в работах В.А. Рыженкова, В.Т. Шириняна, Р.А. Ильина, В.В. Бухмирова, Т.А. Низиной, А.Е. Инина, А.Н. Кудряшова, А.И. Щелокова и др.

Большой вклад в развитие теоретических и практических аспектов энергосбережения внесли Е.Я. Соколов, Я.М. Щелоков, Н.И. Данилов, Г.А. Романов и др.

В качестве ТПП рассмотрен материал, изготовленный на основе каучука синтетического этиленпропилендиенового (СКЭПТ), представленный в работах О.Р. Ключникова.

Объект исследования – энерготехнологические комплексы, входящие в их состав СТС и теплоизоляционная конструкция трубопроводов СТС с нанесенным на его поверхность ТПП.

Предмет исследования – способ повышения эффективности ЭТК за счет усовершенствования технологической схемы и снижения потерь тепловой энергии через изолированную поверхность трубопроводов при транспортировке теплоносителя в СТС.

Цель диссертационной работы в постановке, структурировании и решении комплексных задач повышения эффективности работы ЭТК и входящих в их состав СТС, оценке эффективности применения ТПП в общей конструкции существующей традиционной тепловой изоляции трубопроводов, в проведении теоретических и экспериментальных исследований характеристик теплоизоляционной конструкции с ТПП, исследовании тепловых процессов, протекающих в конструкции тепловой изоляции с ТПП трубопроводов тепловых сетей.

Задачи исследования

1. Анализ проблем, ведущих к снижению эффективности ЭТК и надежности входящих в их состав СТС.
2. Экспериментальная оценка теплофизических характеристик теплоизоляционной конструкции с ТПП.

3. Экспериментальное исследование процессов, протекающих в теплоизоляционной конструкции СТС с применением ТПП.
4. Математическое моделирование тепловых процессов в тепловой изоляции СТС с ТПП в условиях естественной и вынужденной конвекции.
5. Оценка эффективности и технико-экономическая оценка применения ТПП на поверхности тепловой изоляции трубопроводов СТС поселка Осиново Зеленодольского района Республики Татарстан, в составе ЭТК «Майский».
6. Разработка практических рекомендаций по модернизации технологической схемы, способствующих повышению эффективности ЭТК «Майский».

Научная новизна

1. Впервые определены теплофизические характеристики ТПП в общей конструкции традиционной тепловой изоляции трубопроводов СТС с основным слоем из минеральной ваты и покровным слоем из стеклопластика.
2. Экспериментально определены плотности тепловых потоков, проходящих через конструкцию тепловой изоляции до и после нанесения ТПП, характеризующие тепловые потери, выявленные в результате исследования, основанного на методе неограниченного цилиндрического слоя.
3. Впервые проведено математическое моделирование тепловых процессов, протекающих в конструкции тепловой изоляции трубопроводов СТС с применением ТПП.
4. На основании математической модели проанализировано состояние основного изоляционного и покровного слоев, состоящих из минеральной ваты и стеклопластика и их общее влияние на энергосберегающие характеристики.
5. Разработан метод энергосбережения при передаче тепловой энергии за счет снижения потерь тепла через тепловую изоляцию трубопроводов СТС с применением ТПП на поверхности существующей традиционной изоляции.
6. Представлен совокупный системный эффект от внедрения мероприятий по модернизации, способствующих повышению эффективности работы ЭТК.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований в дальнейшем могут быть использованы для моделирования теплообменных процессов, протекающих в толще многослойной теплоизоляционной конструкции сложной конфигурации в зависимости от состояния основного и покровного слоев, а также от способа размещения трубопроводов.

Практическая значимость работы: результаты диссертационной работы целесообразно использовать на этапе проектирования для прогнозирования динамики ухудшения свойств тепловой изоляции, на этапе эксплуатации для оценки состояния теплоизоляционных конструкций, повышения надежности и своевременного восстановления теплозащитных свойств. Предложенный способ энергосбережения при транспортировке тепловой энергии в СТС, а также мероприятия по модернизации технологической схемы ЭТК позволят улучшить финансово-экономические показатели объектов распределенной энергетики, повысить их инвестиционную привлекатель-

ность при проведении работ по модернизации, реконструкции и техническому перевооружению, что в дальнейшем позволит повысить экономические показатели энергетических систем, как на региональном, так и федеральном уровнях.

На защиту выносятся

1. Результаты экспериментальных исследований тепловых процессов в теплоизоляционной конструкции с применением ТПП.
2. Результаты математического моделирования и численного решения тепловых процессов в тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей с нанесенным ТПП.
3. Результаты оценки эффективности применения ТПП в общей конструкции традиционной теплоизоляционной конструкции СТС, состоящей из минеральной ваты и стеклопластика.
4. Результаты технико-экономической оценки и рекомендации по повышению теплозащитных свойств существующей тепловой изоляции СТС.
5. Совокупный системный эффект от усовершенствования технологической схемы ЭТК «Майский», а также применения ТПП в общей конструкции тепловой изоляции СТС в составе ЭТК «Майский».

Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов полученных экспериментальных данных в работе подтверждается применением действующих аттестованных методик и государственных стандартов, а также использованием аттестованных средств измерений с высоким классом точности, прошедших периодическую поверку.

Апробация работы. Содержание и основные результаты работы докладывались и обсуждались на XVI международном симпозиуме «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение» (г. Казань, 2016 г.); двенадцатой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2017» (г. Иваново, ИГЭУ, 2017 г.); XII международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (г. Казань, КГЭУ, 2017 г.); международной молодежной научной конференции «XXIII Туполевские чтения (школа молодых ученых)» (г. Казань, КНИТУ-КАИ, 2017 г.); III молодежной научно-практической конференции филиала ОАО «ТГК-16» - «Казанская ТЭЦ-3» (г. Казань, Казанская ТЭЦ-3, 2018 г.); международной научно-практической конференции «Водно-энергетический форум-2018» (г. Казань, КГЭУ, 2018 г.); IV Национальной научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве» (г. Казань, КГЭУ, 2018 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 11 работ, из них 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 3 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК, 1 статья в журнале, индексируемом в международной базе Scopus и 6 публикаций в материалах и тезисах международных, национальных и всероссийских научных конференций.

Методология и методы исследования опираются на основные положения системных исследований в энергетике, общеизвестные законы теплообмена, термодина-

мики и гидродинамики, физический эксперимент; методы сопоставления экспериментальных и теоретических данных; методы математического моделирования; методы тепловизионной диагностики; методы расчета экономической оценки инвестиций. Экспериментальные исследования проведены согласно теории подобия на основе физической модели конструкции тепловой изоляции трубопровода на основе метода неограниченного цилиндрического слоя. Теоретические исследования проведены на основе уравнений гидродинамики и конвекции в соответствии с законом Дарси, в приближении Буссинеска. Численное моделирование выполнено методом конечных элементов. Для анализа и визуализации полученных данных использовался пакет программ MSOffice 2007, FlexPDEи КОМПАС-3DV13.

Личное участие автора. Автор принимал участие в постановке цели и задач исследований, разработке модели конвективного теплообмена, математической модели, разработке экспериментального стенда, методик исследований. Автором проведено численное и экспериментальное исследование процессов, анализ, обработка и обобщение полученных результатов, разработка способа повышения эффективности объекта распределенной энергетики ЭТК, а также надежности существующей тепловой изоляции трубопроводов СТС в составе ЭТК с применением ТПП.

Соответствие паспорту специальности. По тематике, методам исследования, предложенным новым научным положениям диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы, в части пункта 3 – использование на этапе проектирования и в период эксплуатации методов математического моделирования с целью исследования и оптимизации структуры и параметров энергетических систем и комплексов и происходящих в системах энергетических процессов, пункта 5 – разработка и исследование в области энергосбережения и ресурсосбережения при производстве тепловой и электрической энергии, при транспортировке теплоты и энергоносителей в энергетических системах и комплексах, пункта 6 – исследование влияния технических решений, принимаемых при создании и эксплуатации энергетических систем и комплексов, на их финансово-экономические и инвестиционные показатели, региональную экономику и экономику природопользования.

Объем и структура работы. Диссертационная работа изложена на 239 страницах и состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 6 приложений. Работа включает в себя 67 рисунков, 56 таблиц. Список литературы содержит 174 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы и задачи исследования, изложены научная новизна, практическая значимость работы и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ состояния проблемы повышения эффективности ЭТК, надежности и экономичности эксплуатирующихся трубопроводов СТС.

Проведен анализ существующих видов теплоизоляционных материалов и приведена их классификация. Отмечено, что в последние десятилетия список теплоизоляционных материалов дополнили ТПП различных производителей, с различным составом и наполнителями. Представлены требования, предъявляемые при выборе теплоизоляционных конструкций трубопроводов СТС согласно нормативной документации. Рассмотрено изменение свойств волокнистой тепловой изоляции на основе минеральной ваты в процессе эксплуатации и их влияние на теплозащитные характеристики. Описаны способы повышения эффективности применяемых теплоизоляционных материалов в конструкции трубопроводов СТС. Показана целесообразность применения ТПП в общей конструкции тепловой изоляции.

Проанализированы литературные данные, посвященные теоретическому описанию и математическому моделированию теплообменных процессов в волокнистых теплоизоляционных конструкциях. Изучено влияние внешних и внутренних процессов, влияющих на теплообмен в толще теплоизоляционной конструкции трубопроводов СТС.

Во второй главе представлены результаты экспериментальных исследований тепловых процессов в теплоизоляционной конструкции с ТПП.

Исследование теплопроводности теплоизоляционной конструкции с ТПП проводилось на основании методики стационарного теплового потока, проходящего через исследуемый образец теплоизоляционной конструкции, с использованием прибора - измеритель теплопроводности ИТС-1. Полученные результаты показали, что среднее значение коэффициента теплопроводности теплоизоляционной конструкции без ТПП составило $42,70 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·К), после нанесения на поверхность в 1 слой $43,10 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·К), с покрытием в 2 слоя $43,49 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·К) и в 3 слоя $44,29 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м·К). В процентном соотношении, изменение коэффициента теплопроводности, после нанесения ТПП, увеличилось на 1%, 2% и 4% в соответствии с количеством нанесенных слоев.

Исследование теплового излучения теплоизоляционной конструкции с ТПП заключалось в определении интегрального коэффициента излучения радиационным методом с применением неселективного радиометра «Аргус-03». Данные, полученные в результате эксперимента, показали, что интегральный коэффициент излучения ТПП на поверхности тепловой изоляции незначительно отличается от интегрального коэффициента излучения стеклопластика, выступающего в качестве покровного слоя традиционной тепловой изоляции трубопровода тепловой сети.

Проведена экспериментальная оценка воздухопроницаемости стеклопластика и установление зависимости воздухопроницаемости от наличия на его поверхности ТПП в зависимости от количества нанесенных слоев. В основе метода определения воздухопроницаемости лежит установление времени прохождения определенного объема воздуха через исследуемый образец при известном давлении воздуха. В результате проведенных исследований по определению воздухопроницаемости образцов стеклопластика без покрытия и с нанесенным ТПП средние значения

теплоизоляционной конструкции с ТПП; $\delta_{тр}$ – толщина стенки трубы; $\delta_{мв}$ – толщина минеральной ваты; $\delta_{стп}$ – толщина стеклопластика с нанесенным ТПП

Теплоизоляционная конструкция трубопровода представляет собой кольцевую прослойку пористого материала, образованную двумя горизонтальными коаксиальными цилиндрами. Пористый материал состоит из двух слоев – минеральной ваты и покровного слоя из стеклопластика с нанесенным ТПП.

Согласно физической трехмерной модели трубопровода (рис. 2) теплообмен протекает идентично по длине в радиальном направлении, и основное изменение теплового потока происходит в плоскости поперечного сечения, поэтому моделирование проведено в двухмерных координатах. Ввиду наличия симметрии относительно вертикальной оси, проходящей через центр кольцевой прослойки, математическая модель представлена для половины кольцевой прослойки (рис. 3).

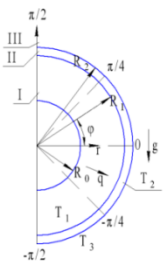


Рис. 3. Двухмерная модель теплоизоляционной конструкции трубопровода: I – основной изоляционный слой (минеральная вата); II – покровный слой (стеклопластик с нанесенным ТПП); III – окружающая среда воздух; R_0 – внутренний радиус основного изоляционного слоя; R_1 – внешний радиус основного изоляционного слоя; R_2 – наружный радиус теплоизоляционной конструкции; T_0 – температура теплоносителя; T_1 – температура основного изоляционного слоя; T_2 – температура покровного слоя; T_3 – температура окружающего воздуха.

Для расчета полей течения и переноса тепла в стационарных условиях применено уравнение конвекции в приближении Буссинеска, где поверхностная сила была заменена эквивалентной объемной силой сопротивления в соответствии с законом Дарси.

$$\mu \bar{v}/k = -\nabla p + \rho g \beta \Delta T, \quad (1)$$

$$\text{div } v = 0, \quad (2)$$

$$\sigma(\bar{v}\nabla)T = \lambda^* \nabla^2 T \quad (3)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости; \bar{v} – скорость; k – коэффициент проницаемости пористой среды; p – отклонение давления от статистического; ρ – плотность; g – ускорение свободного падения; β – коэффициент объемного расширения; $\Delta T = T - T^*$ – разность между местной и некоторой опорной температурой; T^* – опорная температура; λ^* – эффективный коэффициент теплопроводности тепловой изоляции; σ – коэффициент теплоемкости.

$$\sigma = \varepsilon \rho \cdot c_p, \quad (4)$$

где c_p – удельная теплоемкость воздуха, заполняющего поры; ε – пористость.

При наличии симметрии относительно вертикальной оси граничные условия для угла $\varphi = \pm \pi/2$ имеют вид

$$R_0 < r < R_2, \nabla t = 0, \nabla p = 0 \quad (5)$$

Таким образом, граничные условия для угла $-\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2$ примут вид

$$R_0 < R_1, R_0 \leq r \leq R_1 \quad (6)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1, \lambda^* = \lambda^*_1, \rho = \rho_1, K = K\rho_1, c_p = c_{p1} \quad (7)$$

$$R_1 < R_2, R_1 \leq r \leq R_2 \quad (8)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_2, \lambda^* = \lambda^*_2, \rho = \rho_2, K = K\rho_2, c_p = c_{p2} \quad (9)$$

$$r = R_0: \nabla p = 0, t = T_0 \quad (10)$$

$$r = R_2: p_2 = \rho g(2R_1 - y), \nabla t = \frac{\alpha_3}{\lambda_2^*} (T_2 - T_3) \quad (11)$$

где Kp_1 – проницаемость основного изоляционного слоя; Kp_2 – проницаемость покровного слоя, состоящего из стеклопластика и нанесенного на его поверхность ТПП.

Поскольку толщина покровного слоя много меньше толщины минеральной ваты $\delta_2 \ll \delta_1$, то при моделировании двухслойной конструкции можно заменить второй слой эквивалентным термическим и гидравлическим сопротивлением.

$$r = R_2: \nabla t = \frac{1}{\lambda_1^*} \frac{T_1 - T_3}{\frac{\delta_2}{\lambda_2^*} + \frac{1}{\alpha_3}} \quad (12)$$

Так как $\delta_2 \approx 0,2 \cdot 10^{-3}$ м, $\lambda_2^* \approx 0,6$ Вт/(мК) и $\alpha \approx 10^0 \div 10^2$, при этом $\frac{\delta_2}{\lambda_2^*} \lesssim \frac{1}{\alpha}$, тогда уравнение (12) можно записать в следующем виде

$$\nabla t = \frac{\alpha_3}{\lambda_1^*} (T_1 - T_3) \quad (13)$$

$$\nabla p = \frac{Kp_2}{Kp_1 \delta_2} (P_1 - P_3) \quad (14)$$

$$P_3 = \rho g(2R_1 - y) + \bar{P}_4 \quad (15)$$

где α_3 – коэффициент теплоотдачи при вынужденном движении воздуха; \bar{P}_4 – задается по графику распределения давления.

Численное решение математической модели выполнено методом конечных элементов, с применением программы *FlexPDE*, предназначенной для решения системы дифференциальных уравнений в частных производных.

В рамках численного эксперимента исследованы два наиболее распространенных способа прокладки трубопроводов СТС – на открытом воздухе и в помещении (техническое подполье, подвал и т.д.). При размещении трубопроводов в технических подпольях, подвалах, камерах и павильонах теплообменные процессы в оболочке теплоизоляционной конструкции протекают в условиях естественной конвекции, а при нахождении их на открытом воздухе под воздействием ветровой нагрузки, в условиях вынужденной конвекции.

Для оценки эффективности применения ТПП в вышеприведенных условиях задавались рядом значений проницаемости: основной слой изоляции – $Kp_1 = [1,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2, 1,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2]$, при этом $Kp_1 = 1,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$ характеризует изоляцию, состояние которой отвечает требованиям технических стандартов и норм, а при $Kp_1 = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$ рассмотрен наихудший вариант ее разрушений; покровный слой – $Kp_2 = [1,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2, 1,8 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2]$, так $Kp_2 = 1,8 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ характерно для покровного слоя с нанесенным на его поверхность ТПП в три слоя, а $Kp_2 = 1,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$ – разрушенному покровному слою (рис. 4, 6).

Оценка эффективности применения тонкопленочного покрытия определялась отношением среднего теплового потока с поверхности изоляции трубопровода к среднему нормативному тепловому потоку с поверхности изоляции трубопровода, который соответствует проницаемости основного слоя изоляции $Kp_1 = 1,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$ и покровного слоя $Kp_2 = 3,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$. Эти результаты отражены на графиках (рис. 5, 7).

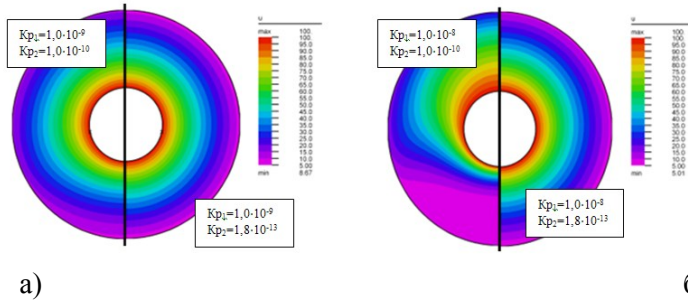


Рис. 4. Распределение температуры в слое изоляции в условиях естественной конвекции, трубопровод диаметром 57 мм с толщиной изоляционного слоя 60 мм: а) при $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$; б) $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$.

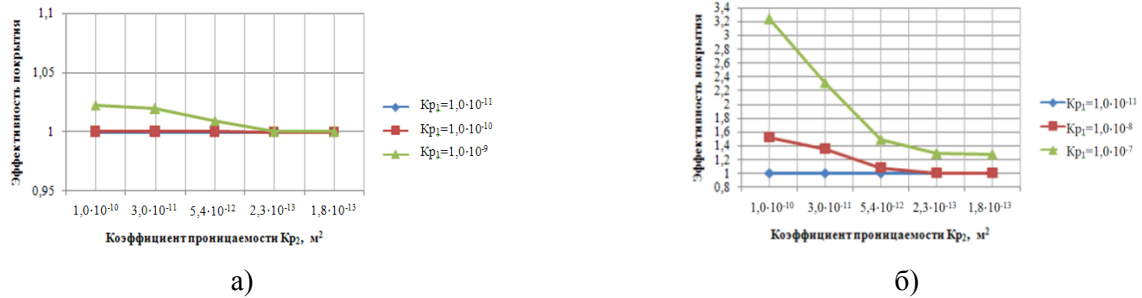


Рис. 5. Эффективность ТПП для трубопровода диаметром 57 мм с толщиной изоляционного слоя 60 мм, коэффициент проницаемости основного изоляционного слоя $K_{p1}, \text{ м}^2$ и коэффициент проницаемости покровного слоя $K_{p2}, \text{ м}^2$: а) при $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11}$, $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-10}$, $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9}$; б) при $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11}$, $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8}$, $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-7}$.

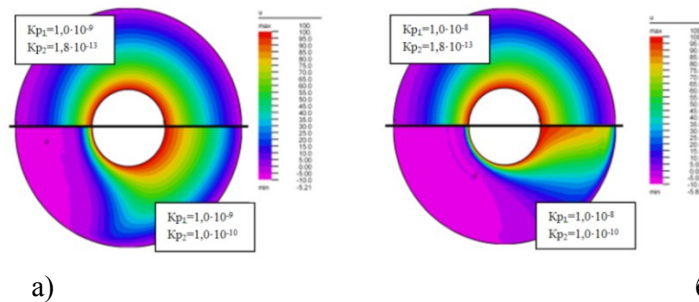


Рис. 6. Распределение температуры в слое изоляции в условиях вынужденной конвекции, трубопровод диаметром 57 мм с толщиной изоляционного слоя 60 мм: а) при $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$; б) $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$.

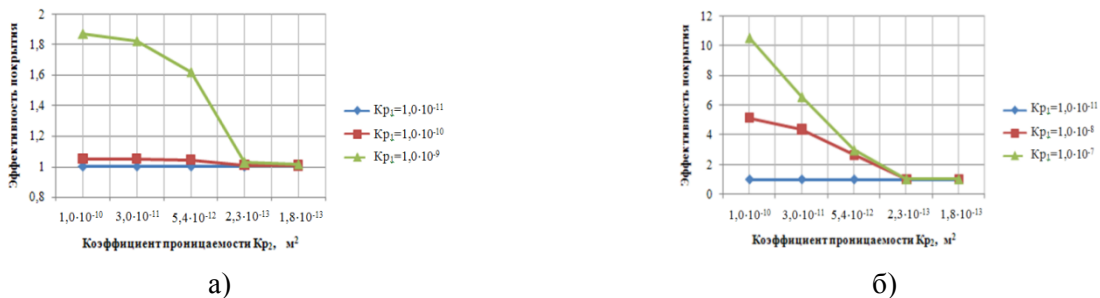


Рис. 7. Эффективность ТПП для трубопровода диаметром 57 мм с толщиной изоляционного слоя 60 мм, коэффициент проницаемости основного изоляционного слоя $K_{p1}, \text{ м}^2$ и коэффициент проницаемости покровного слоя $K_{p2}, \text{ м}^2$: а) при $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11}$, $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-10}$, $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9}$; б) при $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11}$, $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8}$, $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-7}$.

При условии одинакового состояния основного изоляционного слоя состояние покровного слоя влияет на распределение температур в рассматриваемой области. Так после нанесения ТПП $K_{p2}=1,8 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ наблюдается изменение температурных полей, в сравнении с $K_{p2}=1,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$. Эти изменения характерны для обоих рассмотренных ва-

рианта размещения трубопроводов в условиях естественной (рис. 4) и вынужденной конвекции (рис. 6).

Согласно оценке полученных результатов, представленных на рис. 5, в условиях естественной конвекции, в случае $K_{p1}=10^{-9}$ м² при разрушенном покровном слое и покровном слое без ТПП наблюдалось снижение эффективности, что соответствовало потерям в размере 2%. После нанесения ТПП в один слой потери составили менее 1%, а нанесение второго слоя показало результаты, соответствующие нормативным требованиям, т.е. состоянию новой изоляции.

Для условий $K_{p1}=10^{-8}$ м² характерны следующие результаты: при разрушенном покровном слое потери превысили нормативные на 50%; при покровном слое без ТПП эти показатели составили 35%; после нанесения первого слоя снизились до 8%; после нанесения второго слоя составили 5% и приблизились к нормативным.

В условиях вынужденной конвекции (рис. 7) эффективность при проницаемости $K_{p1}=10^{-9}$ м² составила: при разрушенном покровном слое потери составили 87%; при покровном слое без ТПП - 83%; с покрытием в один слой потери снизились на 62%, после нанесения второго слоя эти показатели составили порядка 2,7%.

При состоянии основного слоя $K_{p1}=10^{-8}$: при разрушенном покровном слое потери тепла превысили нормативные в 4 раза и составили 417%; при покровном слое без ТПП в 3,5 раза (340%); нанесение первого слоя позволило снизить эти потери до показателей, превышающих нормативные в 1,7 раза (166%); нанесение второго слоя улучшило ситуацию, где потери составили 3,2%; после нанесения третьего слоя потери составили 2% от нормативных.

В четвертой главе проведена тепловизионная диагностика эффективности применения ТПП на поверхности существующей изоляции трубопроводов СТС. Результаты тепловизионной диагностики, выполненные на базе ФГБОУ ВО КГЭУ, подтвердили, что внедрение результатов диссертационного исследования может способствовать снижению тепловых потерь за счет снижения плотности тепловых потоков, что свидетельствует о повышении надежности тепловой изоляции. Установлено, что результаты исследований качественно соответствуют данным других авторов.

Рассмотрен способ достижения результата по энергоэффективности и энергосбережению объекта распределенной энергетики ЭТК «Майский» и входящей в его состав СТС Осиновского сельского поселения Зеленодольского района Республики Татарстан, за счет повышения надежности существующей тепловой изоляции трубопроводов СТС с применением ТПП, способствующий снижению потерь тепловой энергии и усовершенствованию технологической схемы ЭТК «Майский».

Приведены результаты расчетов среднегодовых потерь тепловой энергии в СТС поселка Осиново с учетом фактического состояния тепловой изоляции трубопроводов. Среднегодовая величина потерь тепла за отопительный период составила в подающем трубопроводе 1 064,74 Гкал/год и в обратном 902,03 Гкал/год.

Представлены результаты расчетов среднегодовых показателей потерь тепла с поверхности изолированного трубопровода после нанесения ТПП.

Проведена технико-экономическая оценка эффективности применения ТПП на поверхности существующей изоляции трубопроводов СТС Осиновского сельского поселения. Результаты расчета показали целесообразность внедрения данного мероприятия со сроком окупаемости 1,5 года (табл. 1).

Таблица 1 Результаты технико-экономической оценки нанесения ТПП на поверхность изоляции трубопроводов СТС поселка Осиново в составе ЭТК «Майский»

№ п/п	Наименование мероприятия	Инвестиции, руб.	Сбереженная за год энергия, Гкал/год	Годовое чистое сбережение, руб./год	Срок окупаемости, лет
1	Нанесение ТПП на поверхность изоляции трубопроводов СТС поселка Осиново в составе ЭТК «Майский»	616 534,00	393,35	402 090,40	1,5

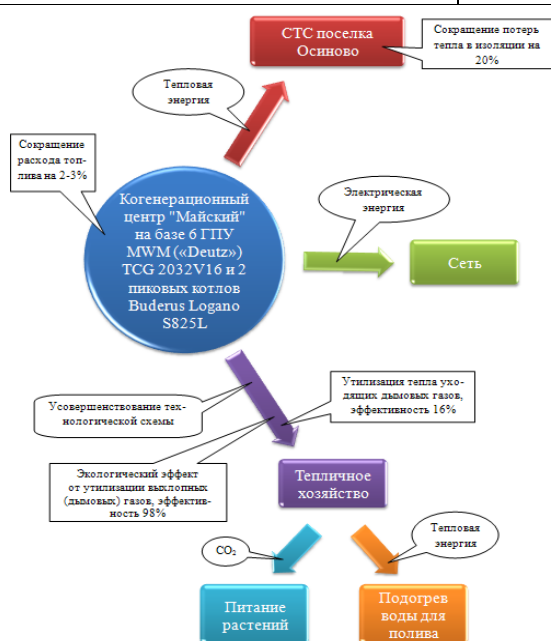


Рис.8. Схема энерготехнологического комплекса «Майский»

С целью повышения эффективности источника энергоснабжения ЭТК «Майский» предусмотрено усовершенствование технологической схемы за счет внедрения системы по снижению вредного воздействия уходящих дымовых газов. На рис. 8 приведена общая схема ЭТК «Майский» с указанием совокупного системного эффекта объекта распределенной энергетики, за счет снижения потерь тепловой энергии в СТС с применением ТПП и внедрения дополнительного оборудования в состав мини-ТЭЦ, работающей на базе когенерационной технологии.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведены экспериментальные исследования по определению коэффициента теплопроводности, интегрального коэффициента излучения и воздухопроницаемости теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты, стеклопластика и ТПП. Установлено, что наибольшее влияние на снижение плотности тепловых потоков оказывает воздухопроницаемость теплоизоляционного материала после нанесения на его поверхность ТПП.

2. Разработана экспериментальная установка по определению плотности тепловых потоков, проходящих через конструкцию тепловой изоляции трубопровода на основе метода неограниченного цилиндрического слоя. Результаты исследований показали, что нанесение ТПП привело к снижению плотности тепловых потоков на 17%.

3. Проведено математическое моделирование процессов теплообмена в пористой тепловой изоляции трубопроводов СТС в зависимости от состояния теплоизоляционных материалов и условий размещения трубопроводов. Результаты, полученные в

процессе математического моделирования, показали их хорошую сходимость с работами других авторов и результатами проведенных экспериментов.

4. Проведена оценка эффективности применения ТПП в структуре традиционной тепловой изоляции трубопроводов СТС. Показано, что при ухудшении состояния основного изоляционного слоя можно за счет применения ТПП, путем его нанесения на покровный слой, снизить тепловые потери от 5 до 20% и более. В условиях, когда трубопроводы расположены в помещении и протекание тепловых процессов в теплоизоляционной конструкции осуществляется в условиях естественной конвекции, достаточно нанесения одного слоя ТПП. При размещении трубопроводов СТС на открытом воздухе, где протекание тепловых процессов в изоляции осуществляется в условиях вынужденной конвекции, необходимо нанесение как минимум двух слоев ТПП для достижения результатов по снижению потерь тепла при транспортировке.

5. Проведена технико-экономическая оценка эффективности применения ТПП на поверхности существующей изоляции внутриквартальных сетей теплоснабжения Осиновского сельского поселения. Результаты расчета показали целесообразность внедрения данного мероприятия со сроком окупаемости 1,5 года.

6. Предложен способ усовершенствования технологической схемы источника энергоснабжения ЭТК «Майский», с целью снижения вредного воздействия уходящих дымовых газов.

7. Приведен совокупный системный эффект от применения ТПП в общей конструкции тепловой изоляции трубопроводов СТС и влияние его на повышение эффективности энергетической системы в целом на примере объекта распределенной энергетики ЭТК «Майский».

Перспективность дальнейших исследований заключается в изучении потенциала объектов распределенной энергетики на базе когенерационных технологий, увеличение их мощности для обеспечения прироста спроса на тепловую энергию, а также изменение подхода к сложившейся практике и нормативному регулированию в отрасли.

Основное содержание исследования отражено в следующих публикациях:

В рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:

1. **Закирова И.А.** Совершенствование тепловой изоляции тепловых сетей с применением тонкопленочных покрытий / И.А. Закирова, Н.Д. Чичирова // Труды Академэнерго. 2016. № 3. С. 43-57.
2. **Закирова И.А.** Экспериментальное определение эффективности тепловой изоляции тепловых сетей с применением тонкопленочных покрытий / И.А. Закирова, Н.Д. Чичирова // Надежность и безопасность энергетики. 2017. № 2. С. 148-154.
3. **Закирова И.А.** Разработка методов расчета и результаты экспериментальных исследований, направленных на повышение эффективности и продление ресурса тепловой изоляции трубопроводов и теплового оборудования энергетических систем / И.А. Закирова, Н.Д. Чичирова, С.М. Маргулис // Труды Академэнерго. 2018. №4. С. 62-73.

В изданиях, включенных в международную базу цитирования Scopus:

4. **Zakirova I.A.** The improving effectiveness thermal insulation of heating systems with thin-film covering using / I.A. Zakirova, N.D. Chichirova // International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET) Volume 10, Issue 01, January 2019, pp. 1142-1146.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

5. Программа расчета тепловых процессов в тепловой изоляции тепловых сетей с нанесенным тонкопленочным покрытием / Закирова И.А., Чичирова Н.Д., Саитов С.Р. // программа для ЭВМ № 2017663334 Рос. Федерация, дата рег. 29.11.2017; заявл. №2017660249, 12.10.2017; опубли. 29.11.2017.

В других изданиях:

6. **Закирова И.А.** Исследование применения тонкопленочного резинового покрытия для снижения потерь тепла при передаче тепловой энергии по трубопроводам тепловых сетей / И.А. Закирова // Труды XVI Международного симпозиума «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение». Казань. 2016. С. 139-141.

7. **Закирова И.А.** Применение тонкопленочного покрытия на поверхности изоляции трубопроводов тепловых сетей с целью снижения плотности тепловых потоков / И.А. Закирова // Двенадцатая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2017» Материалы конференции. 2017. Т.1 С. 205.

8. **Закирова И.А.** Повышение эффективности систем теплоснабжения с применением тонкопленочных покрытий / И.А. Закирова // XII международная молодежная научная конференция «Гинчуринские чтения». Материалы докладов. 2017. Т. 2. С. 26-27.

9. **Закирова И.А.** Повышение эффективности минераловатной тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения с применением тонкопленочных покрытий / И.А. Закирова // Международная молодежная научная конференция «XXIII Туполевские чтения (школа молодых ученых)» Материалы конференции. Сборник докладов. 2017 Т. 1 С. 838-841.

10. **Закирова И.А.** Математическое моделирование тепловых процессов в изоляции трубопроводов тепловых сетей с применением тонкопленочных покрытий / И.А. Закирова, Н.Д. Чичирова // Международный водно-энергетический форум – 2018: сборник докладов в 2 т. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. Т. 1. С. 370-375.

11. **Закирова И.А.** Продление ресурса существующей тепловой изоляции систем централизованного теплоснабжения / И.А. Закирова, Н.Д. Чичирова // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве: материалы IV Национальной научно-практической конференции (Казань, 6-7 декабря, 2018 г.) в 2 т. / редкол.: Э.Ю. Абдуллазянов (гл. редактор) и др. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. Т. 1. С. 282-288.

Подписано в печать 28.03.2019. Формат 64x80 1/16. Бумага офсетная.
Печать ризографическая. Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100. Заказ № 2803/3.

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии «Вестфалика» (ИП Колесов В.Н.)
420111, г. Казань, ул. Московская, 22. Тел.: 292-98-92 e-mail: westfalika@inbox.ru
