



*На правах рукописи*

**БАЗУКОВА ЭЛЬВИРА РАЙСОВНА**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ  
ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕПЛОЙ ИЗОЛЯЦИИ СО СТАБИЛЬНЫМИ  
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

2.4.5 – Энергетические системы и комплексы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань 2023

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» на кафедре «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Ваньков Юрий Витальевич**

**Официальные оппоненты:** **Половников Вячеслав Юрьевич**, доктор технических наук, научно-образовательный центр И.Н. Бутакова ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», профессор.  
**Пастушков Павел Павлович**, кандидат технических наук, лаборатория «Строительная теплофизика» ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», ведущий научный сотрудник.

**Ведущая организация:** **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (УГНТУ), г. Уфа**

Защита состоится «16» 2023 г. в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.310.02, созданного на базе при ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по адресу: 420066 г. Казань, ул. Красносельская, 51, ауд. Д- 224, тел./факс (843) 519-42-55.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 420066 г. Казань, ул. Красносельская, 51, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.310.02.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и на официальном сайте КГЭУ <http://www.kgeu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Зиганшин Ш.Г.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Доля расхода теплоты на технологию в общем годовом расходе теплоты для предприятий нефтеперерабатывающей промышленности 90-97%, шинной промышленности – 70-80%, химической – 70-75%.

В итоге проведения энергетических обследований промышленных комплексов, специалистами отмечаются следующие проблемы, затрудняющие оценку эффективности применяемых теплоизоляционных материалов:

- нет нормативных документов, определяющих методику оценки фактических тепловых потерь через тепловую изоляцию паропроводов;
- сложности с измерением фактических тепловых потерь систем транспортирования тепло-энергоносителей на действующих объектах в условиях эксплуатации.

По результатам проведенных энергетических обследований также отмечается превышение фактических тепловых потерь относительно нормативных значений, предусмотренных при проектировании.

Для выбора оптимального теплоизоляционного материала важным становится не только низкий коэффициент теплопроводности, но и долговечность выбранного материала в проектируемых условиях эксплуатации, позволяющая обеспечивать стабильность теплозащитных свойств в течении всего срока эксплуатации. В настоящее время отсутствует методика оценки долговечности теплоизоляционных материалов при эксплуатации в условиях высоких температур. Кроме того, при выборе материала возникают сложности с однозначным определением предельной температуры применения.

Результаты исследования получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания №075-03-2021-175/3 от 30.09.2021 г.

### **Степень разработанности темы**

Проблемами повышения эффективности систем транспортирования тепловой энергии, а также проблемами определения фактических тепловых потерь в тепловых сетях занимались В.В. Гурьев, И.А. Башмаков, В.Г. Хромченков, Г.В. Кузнецов, Б.М. Шойхет В.Г. Семенов, С.А. Байбаков, В.Ю. Половников, И.Р. Байков и др. Исследованиями процессов совместного тепло и массообмена в капиллярно-пористых телах занимались А.В. Лыков, О.Е. Власов, Г.А. Максимов, О. Кришер, В.Г. Гагарин и др. Вопросами оценки совместного тепло и влагопереноса и их влияния на теплозащитные свойства тепловой изоляции занимались В.Г. Петров-Денисов, В.С. Жолудов, К.И. Смирнова, И.Я. Киселёв и др. Вопросами оценки долговечности теплоизоляционных материалов занимались

Ю.Л. Бобров, В.Н. Куприянов, А.И. Иванцов, А.В. Ли, А.Г. Дементьев, П.П. Пастушков. др.

**Цель диссертационной работы:** повышение эффективности энергетических комплексов предприятий путем снижения тепловых потерь при транспортировке тепло- и энергоносителей.

**Задачи исследования:**

1. Произвести оценку потенциала энергосбережения от устранения сверхнормативных тепловых потерь при транспортировке тепло- и энергоносителей на примере предприятия шинной промышленности, расположенного на территории Республики Татарстан.

2. Произвести анализ существующих методик по оценке фактических тепловых потерь при транспортировке тепловой энергии. Разработать устройство для измерения плотности теплового потока через тепловую изоляцию эксплуатирующихся трубопроводов.

3. Произвести экспериментальные исследования изменения коэффициента теплопроводности волокнистых изоляционных материалов при деградации структуры материала.

4. Провести оценку реальной предельной температуры применения волокнистых теплоизоляционных материалов, а также оценку их долговечности при воздействии температур в диапазоне 150-400 °С.

5. Разработать комплекс рекомендаций по повышению эффективности энергетических комплексов промышленных предприятий.

**Научная новизна:**

Дана оценка изменения коэффициента теплопроводности волокнистой тепловой изоляции при деградации структуры материала вследствие температурной деструкции полимерного связующего при температурах изолируемой поверхности 150-400 °С.

Показана связь между увеличением коэффициента теплопроводности волокнистых изоляционных материалов в процессе эксплуатации и деструкцией полимерного связующего.

Уточнена предельная температура применения волокнистых теплоизоляционных материалов с учетом деструкции полимерного связующего при эксплуатации в условиях высоких температур, а также предельная температура применения изоляционного материала на основе кварцевого аэрогеля, армированного нетканым материалом из стекловолокна.

На основе данных термогравиметрического анализа определена долговечность теплоизоляционных материалов применяемых для изоляции высокотемпературных объектов.

### **Теоретическая значимость работы**

Полученные результаты расширяют имеющиеся сведения о зависимости коэффициента теплопроводности волокнистых теплоизоляционных материалов от плотности и температуры. Показанная связь между деградацией волокнистых теплоизоляционных материалов вызванной деструкцией полимерного связующего и снижением теплозащитных свойств, а также учет влияния ориентации волокон материала относительно направления теплового потока на коэффициент теплопроводности позволят уточнить существующие расчетные методы определения эффективной теплопроводности и могут дополнить представления о механизме процессов совместного тепло- и массообмена в капиллярно-пористых телах.

### **Практическая значимость работы**

На основании комплексного подхода, затрагивающего этапы проектирования теплоизоляционных конструкций и выбора теплоизоляционного материала, а также период эксплуатации объекта, предложены мероприятия, направленные на повышение эффективности энергетических комплексов предприятий путем снижения тепловых потерь при транспортировке тепло- и энергоносителей.

Уточненная предельная температура применения волокнистых теплоизоляционных материалов, а также возможность прогнозировать долговечность материала в зависимости от температурных режимов эксплуатации позволят на этапе проектирования выбирать теплоизоляционные материалы, обеспечивающие стабильность теплозащитных свойств на протяжении всего срока эксплуатации.

Выбор материала с более длительным сроком эффективной эксплуатации позволит реже проводить работы по замене теплоизоляционных конструкций на объектах, транспортирующих высокотемпературные тепло- и энергоносители.

На основании полученных результатов могут быть уточнены действующие нормативные документы, регламентирующие деятельность по проектированию теплоизоляционных конструкций и выбору теплоизоляционных материалов.

Предложена модель устройства для измерения плотности теплового потока, что позволит проводить измерение фактической плотности теплового потока через тепловую изоляцию паропроводов на действующих объектах.

Для оценки качества тепловой изоляции и соответствия величины фактических тепловых потерь нормативным значениям предложена методика по проведению обследования эксплуатирующихся паропроводов.

Дана оценка потенциала энергосбережения от устранения сверхнормативных потерь при транспортировке высокотемпературных энергоносителей на примере предприятия шинной промышленности, расположенного на территории Республики Татарстан.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач использовались законы теплообмена, термодинамики, положения теории тепло- и массообмена в капиллярно-пористых телах. При проведении экспериментальных исследований использовались методы определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме для объектов плоской и цилиндрической формы. Обработка результатов экспериментов проводилась с применением регрессионного анализа. Определение термической устойчивости материалов осуществлялось с использованием методов термического анализа. Расчет прогнозируемой долговечности осуществлялся с использованием изоконверсионных методов кинетического анализа.

#### **Положения выносимые на защиту**

1. Потенциал энергосбережения от устранения сверхнормативных тепловых потерь при транспортировке тепло- и энергоносителей на примере предприятия шинной промышленности, расположенного на территории Республики Татарстан.

2. Способ оценки фактических тепловых потерь с использованием разработанного устройства для измерения плотности теплового потока через тепловую изоляцию эксплуатирующихся трубопроводов.

3. Методика по оценке эффективности применяемых теплоизоляционных материалов и измерению фактических тепловых потерь эксплуатирующихся паропроводов.

4. Результаты экспериментальных исследований изменения теплопроводности волокнистых изоляционных материалов при деградации структуры материала.

5. Результаты по определению предельной температуры применения волокнистых теплоизоляционных материалов и долговечности теплоизоляционных материалов применяемых для изоляции высокотемпературных объектов.

6. Методика выбора теплоизоляционного материала, обеспечивающего наибольший экономический эффект при организации тепловой защиты паропроводов, а также стабильность теплозащитных свойств в процессе эксплуатации.

**Достоверность результатов** обусловлена проведением экспериментальных исследований по определению теплопроводности теплоизоляционных материалов в соответствии с ГОСТами, проведением термогравиметрии в соответствии с требованиями ГОСТ на высокоточном оборудовании. Энергия активации и другие кинетические параметры определены с применением современных прикладных программных продуктов. Полученные результаты согласуются с опубликованными результатами исследований теплообмена в волокнистых

теплоизоляционных материалах и представлениями о механизмах теплообмена в капиллярно-пористых телах.

**Апробация результатов.** Основные положения работы и результаты исследования докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международная молодежная научная конференция по естественнонаучным и техническим дисциплинам «Научному прогрессу - творчество молодых» (Йошкар-Ола, 2017, 2018 г.); XIV Международная научно - практическая конференция «Инновационные, информационные и коммуникационные технологии» ИНФО-2017 (Сочи, 2017 г.); XIV Международная научно - техническая конференция «Совершенствование энергетических систем и теплоэнергетических комплексов» (Саратов, 2018 г.); III Международная Научно - практическая конференция молодых ученых «Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии» (Альметьевск, 2018 г.); Международный водно - энергетический форум – 2018 (Казань, 2018 г.); II Международный форум «Наука и инновации» (Альметьевск, 2019 г.); Международная научно - техническая конференция Smart Energy Systems 2019 (SES - 2019) (Казань, 2019 г.); Международный научный семинар им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (Казань, 2019 г.); Татарстанский международный форум по энергетике и энергоресурсоэффективности (ТЭФ) – 2022 (Казань, 2022 г.); Международная научно-практическая конференция «Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2022» (Ялта, 2022 г.).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и приложений. Работа содержит: 190 страниц машинописного текста, 45 рисунков, 23 таблицы, 9 приложений на 35 страницах. Библиографический список включает 122 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** обоснована актуальность проблем, поставленных в исследовании. Отмечается, что для Республики Татарстан в структуре производства промышленной продукции на энергоемкие отрасли промышленности приходится 56 %. Проанализированы возможные пути повышения эффективности энергетических комплексов промышленных предприятий.

Проведена оценка потенциала энергосбережения при транспортировке высокотемпературных энергоносителей на примере предприятия шинной промышленности г. Нижнекамск. На некоторых участках сети пароснабжения, транспортирующих перегретый пар с давлением 1,5 и 3,0 МПа с температурой 270 °С и 315 °С, величина фактических тепловых потерь превышала нормативные значения на 40-70 %. Для таких участков общей протяженностью 3385 м возможная экономия от устранения только сверхнормативных потерь составит 2584 Гкал в

год. Величина сверхнормативных потерь по всем рассмотренным участкам составила 4230 Гкал/год. При стоимости тепловой энергии 1070 руб/Гкал, ежегодные сверхнормативные потери на рассмотренных участках оцениваются в 4,5 млн рублей.

**Во второй главе** предложена модель устройства для оценки фактических тепловых потерь через тепловую изоляцию эксплуатирующихся трубопроводов. Для оценки качества тепловой изоляции и соответствия величины фактических тепловых потерь нормативным значениям предложена методика по проведению обследования эксплуатирующихся паропроводов.

Эффективность применяемых для уменьшения тепловых потерь изоляционных материалов оценивается способностью обеспечить величину фактических тепловых потерь в пределах нормативных значений на протяжении всего срока эксплуатации. Отсутствует методика определения фактических тепловых потерь паропроводов, что затрудняет оценку эффективности применяемых теплоизоляционных материалов.

Проверку состояния изоляции трубопроводов в условиях эксплуатации предлагается осуществлять с помощью устройства, в основе работы которого лежит метод дополнительной стенки. Автором был получен патент на полезную модель устройства для измерения плотности теплового потока.

Недостатком существующих приборов является сложность правильного крепления датчиков теплового потока типа «дополнительной стенки» к поверхности материала цилиндрической стенки, тепловые потери через которую необходимо определить. Сущность полезной модели поясняется на рисунке 1.

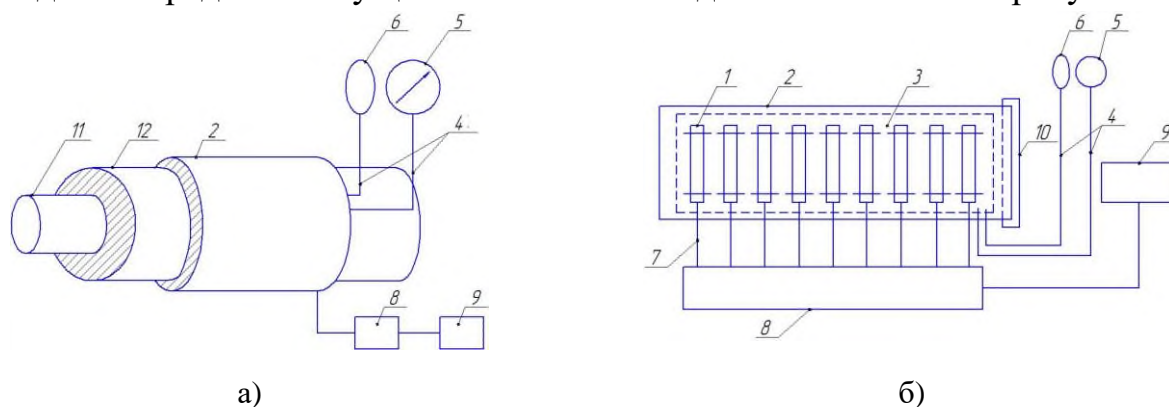


Рисунок 1 а) – расположение устройства для измерения плотности теплового потока на обследуемом трубопроводе в тепловой изоляции; б) – общий вид устройства для измерения плотности теплового потока

Устройство работает следующим образом. На трубопровод 11 (рис. 1 а), изолированный теплоизоляционным материалом 12, тепловые потери через который необходимо определить, надевается манжета 2. Манжета закрепляется с



помощью металлического кольца для крепления 10 (рис. 1 б). На внутренней части манжеты расположены датчики теплового потока 1 (рис. 1 б). С помощью нагнетателя 6 в пневмокамеру 3 компрессионной манжеты 2 нагнетается воздух через пневмотрубку 4. Требуемое давление в пневмокамере контролируется с помощью манометра 5, соединенного с компрессионной манжетой 2 с помощью пневмотрубок 4. Давление в пневмокамере выбирается таким, чтобы обеспечить плотное прижатие датчиков теплового потока к поверхности теплоизолированного трубопровода, но при этом не допустить механических повреждений или изменения плотности материала в месте установки манжеты. Датчики теплового потока выполнены с возможностью передачи аналогового сигнала на аналого-цифровой преобразователь 8. Сигнал обрабатывается, значения величины плотности теплового потока выводятся на экран персонального компьютера 9.

Для оценки качества тепловой изоляции и соответствия величины фактических тепловых потерь нормативным значениям предлагается следующая методика по проведению обследования эксплуатирующихся паропроводов.

1) Обследуемая сеть паропроводов разбивается на участки по следующим критериям: надземная прокладка на открытом воздухе / в помещении; год ввода в эксплуатацию / замены теплоизоляционной конструкции; наружный диаметр изолируемых трубопроводов; проектные значения параметров теплоносителя (температура, давление). Отмечается длина каждого участка.

2) На каждом участке определяют линейные термически однородные зоны (без учета запорной арматуры) с целью определения мест установки устройства для измерения плотности теплового потока. Для определения термически однородных зон проводится термографическое обследование каждого участка. Фиксируется длина каждой термически однородной зоны.

3) Перед проведением измерения снимается металлический покрывной слой для установки манжеты измерительного устройства. Производится внешний осмотр теплоизоляционного слоя. В отчёте фиксируются видимые дефекты. В случае увлажнения изоляционного слоя данный факт фиксируется в отчёте (или следы присутствия влаги). Для оценки качества тепловой изоляции (отсутствие / наличие деградации теплоизоляционного слоя) измерения должны проводиться при сухом теплоизоляционном слое.

4) С помощью термоанемометра определяют скорость ветра и температуру наружного воздуха, которые фиксируют в отчете. Измерения проводятся при скорости ветра не более 10 м/с. При увеличении скорости ветра возможно получение недостоверных значений удельной плотности теплового потока (превышение значений из-за увеличения конвективной составляющей теплообмена). Измерения проводят при стабильной температуре наружного

воздуха в период измерений и предшествующие дни.

5) Измерение плотности теплового потока производится с использованием описанного выше устройства.

6) На каждом участке для каждой термически однородной зоны фиксируется значение плотности теплового потока, проходящего через слой тепловой изоляции в условиях стационарного процесса теплопередачи (измеряемая плотность теплового потока изменяется во времени не более чем на 5 %), усредненное за время измерений.

7) Для каждого участка определяются нормативные значения удельной линейной плотности теплового потока,  $q_n^{нз}$ , при температуре окружающей среды во время измерений. Нормативные значения определяются путем линейной интерполяции между табличными значениями удельных норм плотности теплового потока по разнице температур:

$$\Delta t = \tau_n^{cp} - t_o^{нз},$$

где  $\tau_n^{cp}$  – средняя температура пара на каждом участке (проектная), рассчитанная при температуре окружающей среды во время измерений, °С;  $t_o^{нз}$  – температура воздуха при проведении измерений, °С.

8) Полученные результаты измерений – фактическая удельная линейная плотность теплового потока  $q_{ф}$  для каждого участка, сравниваются с нормативными значениями  $q_n^{нз}$ . Рассчитывается коэффициент  $K$ , равный отношению фактических удельных тепловых потерь к нормативным значениям:

$$K = q_{ф} / q_n^{нз}.$$

Сравнивая полученные в результате измерений значения с нормативными или с проектными показателями, можно дать оценку качеству состояния тепловой изоляции:

- если фактические удельные тепловые потери на участке не превышают нормативных значений, или превышают их не более чем на 15% состояние тепловой изоляции считается удовлетворительным;

- если фактические удельные тепловые потери превышают нормативные на 15% и более, и в отчете при внешнем осмотре отмечено увлажнение изоляционного слоя или указаны следы присутствия влаги – сверхнормативные потери обусловлены увлажнением изоляции. Даются рекомендации по усилению гидрозащиты теплоизоляционного слоя. Повторное измерение после устранения возможности контакта теплоизоляционного материала с влагой.

- если фактические удельные тепловые потери, измеренные при сухом состоянии теплоизоляционного слоя, превышают нормативные значения на 15% и более – сверхнормативные потери обусловлены деградацией теплоизоляционного

слоя. В зависимости от значений коэффициента  $K$ , намечают пути устранения сверхнормативных потерь.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований по определению коэффициента теплопроводности волокнистых изоляционных материалов в том числе и при деградации структуры материала.

Определение коэффициента теплопроводности для теплоизоляционных изделий цилиндрической формы проводилось в соответствии с ГОСТ 32025-2012. Была собрана экспериментальная установка, схема которой представлена на рисунке 2 а. Для плоских образцов схема установки представлена на рисунке 2 б, испытания проводились в соответствии с ГОСТ 7076-99.

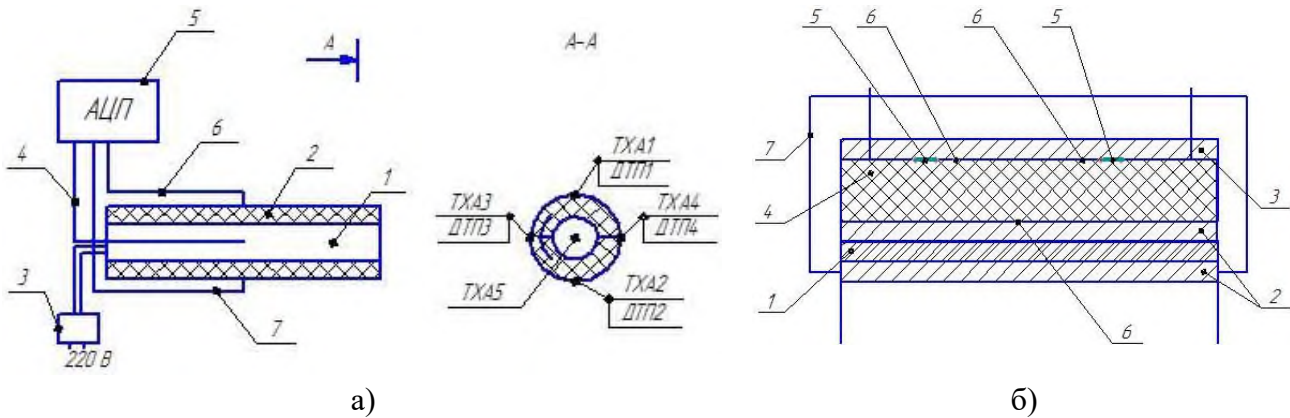


Рисунок 2 Схема установок для определения коэффициента теплопроводности: а) для изделий цилиндрической формы; б) для плоских образцов. На рисунке а): 1 – трубчатый электронагреватель патронного типа (ТЭНП); 2 – теплоизоляционный цилиндр; 3 – лабораторный автотрансформатор; 4 – хромель-алюмелевая термопара нагревателя; 5 – аналого-цифровой преобразователь; 6 – хромель-алюмелевые термопары; 7 – датчики теплового потока типа вспомогательной стенки; ТХА1-4 и ДТП 1-4 – соответственно хромель-алюмелевые термопары и датчики теплового потока, расположенные по периметру цилиндра на 3, 6, 9 и 12 часов. На рисунке б): 1 – плоский керамический нагреватель; 2 – металлическая плита (горячая); 3 – металлическая плита (холодная); 4 – исследуемый образец; 5 – датчики теплового потока; 6 – хромель-алюмелевые термопары; 7 – металлический защитный кожух.

Полученные результаты показывают зависимость коэффициента теплопроводности от температуры, а также от плотности материала рисунки 3-4.

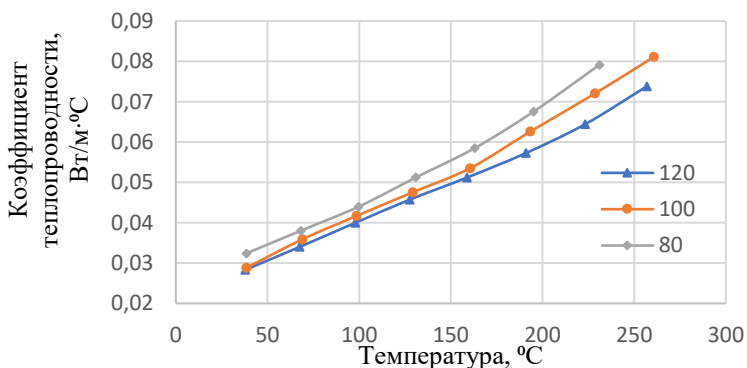


Рисунок 3 Зависимость коэффициента теплопроводности от средней температуры для теплоизоляционных цилиндров плотностями 80, 100 и 120 кг/м<sup>3</sup>

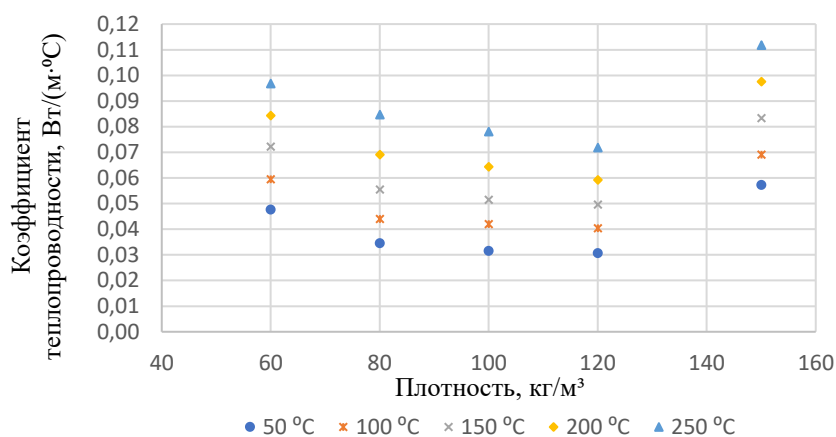


Рисунок 4 Зависимость коэффициента теплопроводности теплоизоляционных цилиндров от плотности и средней температуры теплоизоляционного слоя

На рисунке 3 показана зависимость коэффициента теплопроводности от температуры для теплоизоляционных цилиндров из базальтового волокна одного производителя с плотностями 80, 100 и 120 кг/м³. Из рисунка видно, что с увеличением температуры увеличивается влияние плотности на коэффициент теплопроводности. Также была проведена серия экспериментов для образцов теплоизоляционных цилиндров с плотностями 60 и 150 кг/м³, результаты представлены на рисунке 4.

Для оценки влияния степени деградации структуры материала, связанной с термической деструкцией полимерного связующего, на теплозащитные свойства, образцы теплоизоляционных изделий из базальтового волокна выдерживались при высоких температурах до достижения требуемой степени разложения связующего.

Образцы выдерживались в печи, способной поддерживать постоянную температуру по всему объему в интервале 100-1000 °С. Постоянная температура в печи поддерживается программным ПИД-регулятором ОВЕН ТРМ251.

На рисунке 5 представлен внешний вид образцов вырезных теплоизоляционных цилиндров после выдержки в печи при различных температурах для достижения разной степени выгорания связующего.

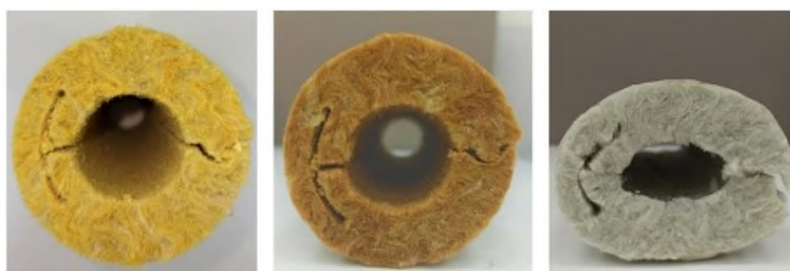


Рисунок 5 Теплоизоляционные цилиндры, плотность 100 кг/м³ (слева направо): новый образец; после 12 часов выдержки при температуре 250 °С (степень конверсии 0,2); после 12 часов выдержки при температуре 650 °С (связующее полностью выгорело)

На рисунке 6 представлено изменение коэффициента теплопроводности при полном выгорании связующего. Измерения проводились в четырех точках по окружности цилиндра (на «12», «3», «6» и «9» часов). Увеличение коэффициента

теплопроводности после выгорания связующего наблюдается на «12» и «9» часов ( $\lambda_1$  и  $\lambda_3$  соответственно). Именно в этих областях волокна преимущественно располагаются параллельно направлению теплового потока, а также наблюдаются явные сквозные поры и капилляры, что при выгорании связующего способствует интенсификации конвективного теплообмена. Для  $\lambda_1$  коэффициент теплопроводности после выгорания связующего увеличился на 18 %, для  $\lambda_3$  – на 55 %.

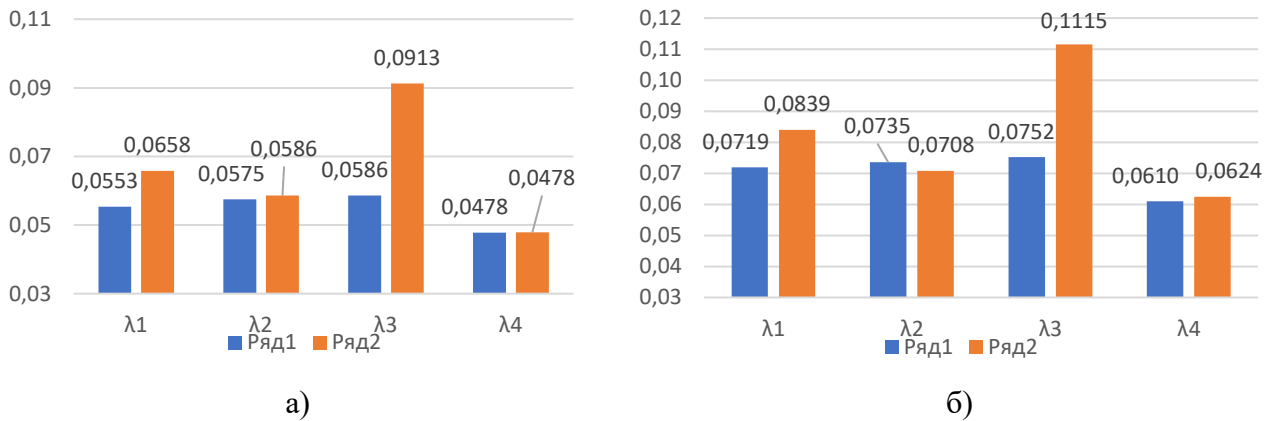


Рисунок 6 Коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , Вт/м·°С, теплоизоляционного цилиндра (образец 1), ряд 1 – до выгорания связующего, ряд 2 – после 12 часов при температуре 650 °С (связующее полностью выгорело). Расположение датчиков теплового потока и термопар на поверхности теплоизоляционного цилиндра:  $\lambda_1$  – на 12 часов;  $\lambda_2$  – на 6 часов;  $\lambda_3$  – на 9 часов;  $\lambda_4$  – на 3 часа. Температура изолируемой поверхности: а) 300 °С; б) 400 °С

Также было исследовано изменение коэффициента теплопроводности базальтовых теплоизоляционных цилиндров при разной степени выгорания связующего (рисунок 7).

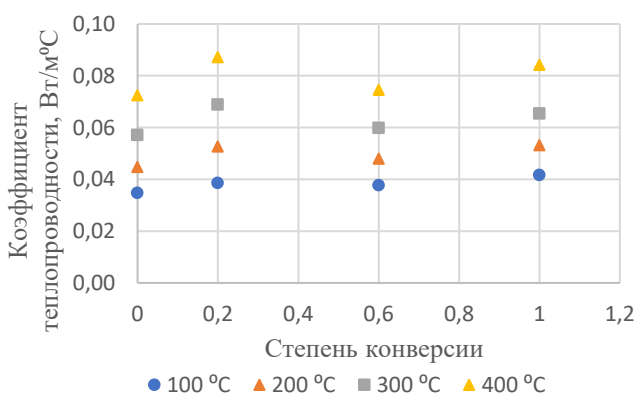


Рисунок 7  
Зависимость коэффициента теплопроводности теплоизоляционных цилиндров от степени выгорания связующего при температурах изолируемой поверхности 100, 200, 300, 400 °С

Относительная погрешность косвенных измерений коэффициента теплопроводности материала составила 4,7 %.

**В четвертой главе** представлены результаты расчета долговечности теплоизоляционных материалов при эксплуатации в условиях высоких температур (200-400 °С), а также предельной температуры применения.

Долговечность теплоизоляционных материалов предлагается определять с

использованием методики расчета кривой термической устойчивости полимерных композитов и органических материалов, представленной в ГОСТ Р 57946-2017 (ASTM 1877-15).

Построение кривой термической устойчивости по следующей формуле:

$$\lg t_f = E / (2.303RT) + \lg[E / (R\beta)] - a, \quad (1)$$

где  $\beta$  – скорость нагревания, К/мин;  $E$  – энергия активации, Дж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, 8,314 Дж/(моль·К);  $T$  – температура в интересующем температурном диапазоне до температуры предельно допустимого ухудшения свойств, К;  $a$  – значение приближенного интеграла Дойла.

Термический индекс ( $TI$ ), К, температура, соответствующая предельно допустимому ухудшению свойств при заданном времени, определяется по формуле:

$$TI = E / (2.303R[\lg t_f - \lg(E / R\beta) + a]) \quad (2)$$

Термический индекс ( $TI$ ) рассматривается как максимальная температура, ниже которой материал является устойчивым по отношению к изменению его свойств в течение выбранного промежутка времени.

Для проведения термогравиметрического анализа (ТГ анализ) в качестве рабочего инструмента использовали TG209F1 Libra (Netzsch GmbH). Были испытаны образцы базальтовой тепловой изоляции следующих производителей: BOS (плотность 80, 100, 120 кг/м<sup>3</sup>); Форвард; Экорол; Rockwool; URSA М, БСТВ, а также материала на основе кварцевого аэрогеля Pyrogel XTE производителя Aspen Aerogels Inc. Для каждого материала произведена серия из шести динамических измерений со следующими скоростями нагрева: 6, 10, 14, 18, 22, 26 °С/мин. Нагрев производился до температуры 650 °С в окислительной атмосфере (воздухе). Образцы БСТВ демонстрируют наименьшие потери массы, менее 1 %, что можно объяснить отсутствием связующих в материале.

По результатам динамического ТГ анализа определена энергии активации в зависимости от степени конверсии. Результаты расчета термического индекса, т.е. предельной температуры эксплуатации при заданном сроке 20 лет для базальтовой тепловой изоляции с полимерным связующим представлены в таблице 1. Для волокнистых теплоизоляционных материалов с полимерным связующим в качестве предельно допустимого ухудшения свойств предлагается рассматривать полное разложение полимерного связующего.

Для обеспечения стабильности теплозащитных свойств волокнистых изоляционных материалов с полимерными связующими материал не должен подвергаться воздействию температур выше, чем приведенные в таблице 1, предельные температуры применения.

Эффективная энергия активации для изоляции Pyrogel XTE определялась для двух этапов разложения. Первый этап в диапазоне температур 150-296 °С. Второй этап в диапазоне температур 491-629 °С. Для изоляции Pyrogel XTE, если в качестве предельно допустимого ухудшения свойств выбирать второй этап разложения (может быть вызван разложением – CH<sub>3</sub> группы и группы SiOH), значения термического индекса приведены в таблице 2.

Таблица 1 Термический индекс (ТИ) базальтовой изоляции с полимерным связующим

Материал	ТИ, °С (эффективная энергия активации рассчитана по методу Озавы-Флинна-Уолла)	ТИ, °С (эффективная энергия активации рассчитана по методу Фридмана)
BOS 80	245±15	201±26
BOS 100	253±15	219±24
BOS 120	210±15	202±15
Экорол	254±9	218±7
Форвард	215±23	195±26
URSA M	194±24	150±17

Таблица 2 Термический индекс (ТИ) изоляции Pyrogel XTE

Степень конверсии	ТИ, °С (эффективная энергия активации рассчитана по методу Озавы-Флинна-Уолла)	ТИ, °С (эффективная энергия активации рассчитана по методу Фридмана)
0,6 (начало этапа 2)	331±33	337±32
0,9	394±35	403±33

На рисунке 8 представлен прогноз термической деструкции полимерного связующего при температуре 450 °С, выполненный по ГОСТ Р 57946-2017 (АСТМ E1877) в сравнении с фактически измеренными данными, полученными из результатов изотермической термогравиметрии. На рисунке 8 видно, что прогноз долговечности материала при воздействии на него температуры 450 °С, полученный при использовании значений энергии активации, рассчитанных по методу Фридмана (по результатам динамических измерений) ближе к процессу изменения степени термической деструкции полимерного связующего при воздействии на материал постоянной температуры.

Кривые термической устойчивости в зависимости от температуры воздействия на материал представлены на рисунке 9. На рисунке 9 а видно, что требуемый срок службы в 20 лет обеспечивается эксплуатацией материала до температур 218 °С. Для изоляции Pyrogel XTE, если в качестве предельно допустимого ухудшения свойств выбирать начало второго этапа разложения

(может быть вызван разложением –  $\text{CH}_3$  группы и группы  $\text{SiOH}$ ), зависимость долговечности материала от температур воздействия представлена на рисунке 9 б.

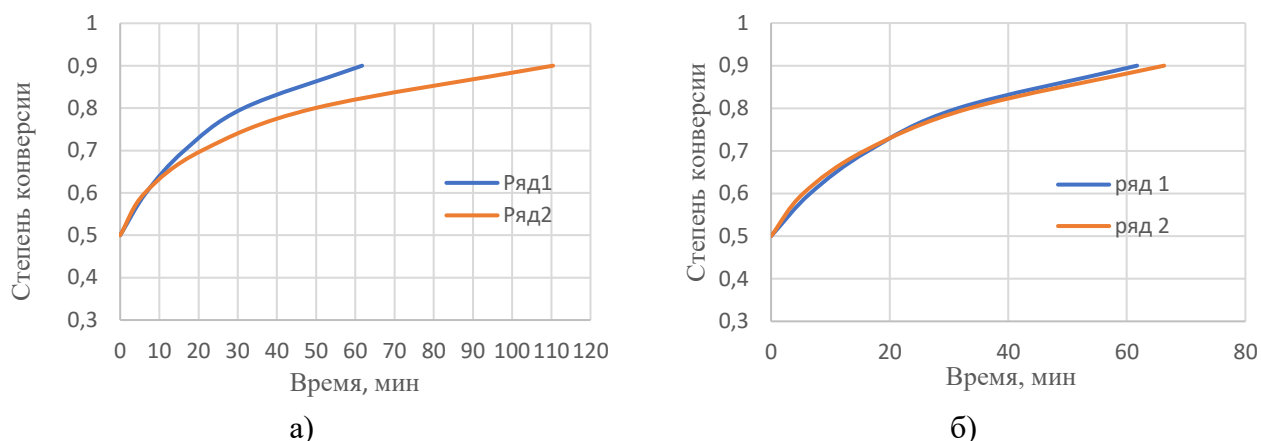


Рисунок 8 Прогноз термической деструкции полимерного связующего при температуре 450 °С, а) ряд 1 – фактические данные из результатов изотермической термогравиметрии; ряд 2 – прогноз по ГОСТ Р 57946-2017, энергия активации определена по методу Озавы-Флинна-Уолла; б) ряд 1 – фактические данные из результатов изотермической термогравиметрии; ряд 2 – прогноз по ГОСТ Р 57946-2017, энергия активации определена по методу Фридмана

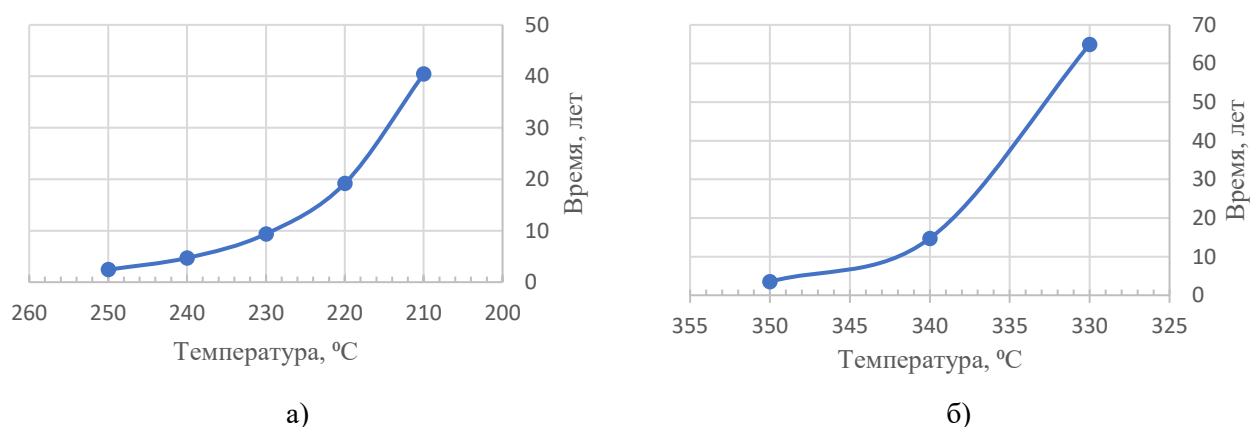


Рисунок 9 Кривые термической устойчивости в зависимости от температуры воздействия на материал: а) BOS 100; б) Pyrogel XTE

Для прогнозирования долговечности теплоизоляционных материалов было разработано несколько программных продуктов, на основании рассмотренной методики ГОСТ Р 57946-2017 (свидетельство о государственной регистрации №2022660400), а также рассчитывая продолжительность старения материала согласно кинетической термофлуктуационной теории и принципу температурно-временной аналогии (№2022663721).

**В пятой главе** показано влияние теплопроводности, долговечности и стоимости материала на экономическую эффективность организованной нормативной теплозащиты. Изменение индекса доходности инвестиций при организации нормативной теплозащиты паропровода надземной прокладки, транспортирующего пар с температурой 400 °С, выполненной из различных



теплоизоляционных материалов, в зависимости от увеличения диаметра изображено на рисунке 10.

Влияние долговечности материала на изменение индекса доходности инвестиций в нормативную теплозащиту паропровода рассмотрено на примере двух изоляционных материалов (рисунок 11).

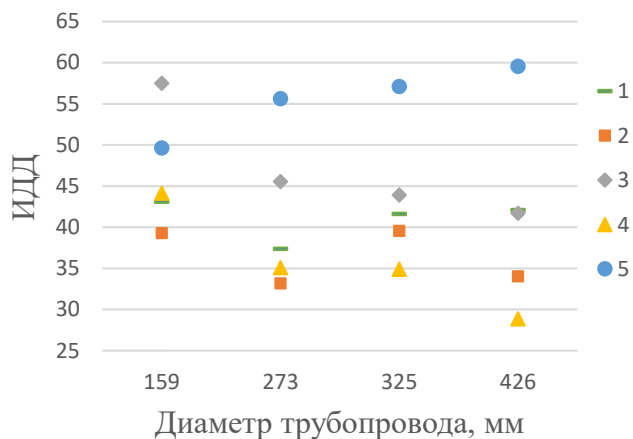
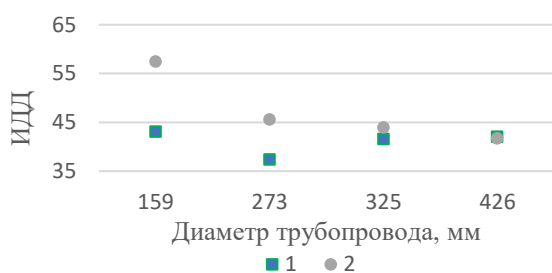
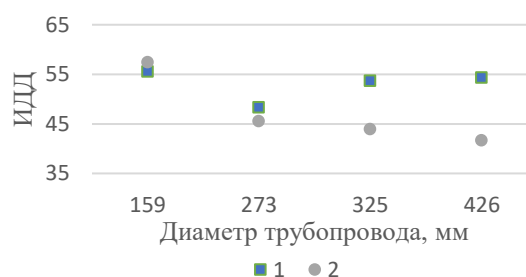


Рисунок 10 Изменение индекса доходности инвестиций в нормативную теплозащиту, 1 – теплоизоляционные цилиндры BOS 100; 2 – теплоизоляционные цилиндры BOS 120; 3 – мат аэрогелевый на основе стеклохолста Evergel; 4 – аэрогелевое полотно на основе стеклохолста Pyshield Pro; 5 – базальтовое супертонкое волокно БСТВ 30



а)



б)

Рисунок 11 Изменение индекса доходности инвестиций в нормативную теплозащиту: а) с учётом необходимости замены материала, содержащего полимерное связующее; б) без учёта необходимости замены материала, содержащего полимерное связующее. 1 – базальтовые теплоизоляционные цилиндры BOS 100; 2 – мат аэрогелевый на основе стеклохолста Evergel.

Для рассматриваемых в первой главе участков со сверхнормативными тепловыми потерями представлены результаты выбора наиболее экономичного теплоизоляционного материала. Для рассматриваемого объекта возможная экономия от организации нормативной тепловой защиты при выборе теплоизоляционного материала с учетом его долговечности составит 3,3 млн. рублей.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Проведена оценка потенциала энергосбережения при транспортировке высокотемпературных энергоносителей на примере предприятия шинной промышленности г. Нижнекамск. Ежегодные сверхнормативные потери на рассмотренных участках оцениваются в 4,5 млн рублей.

Проведенные экспериментальные исследования по определению коэффициентов теплопроводности волокнистых изоляционных материалов при температурах в диапазоне 100-400 °С, в том числе и при деградации структуры материала, показали, что при выгорании полимерного связующего наблюдается увеличение коэффициента теплопроводности в среднем на 20%. Именно выгорание связующего становится причиной разрыхления материала, изменения его формы (уменьшение толщины, провисание), или частичного разрушения. Также с учетом того, что применение связующего помимо скрепления волокон, повышения жесткости и прочности изделия, повышало гидрофобность материала, при его выгорании возможно частичное разрушение или вымывание слоя теплоизоляционного материала при увлажнении капельной влагой.

Уточнена реальная предельная температура применения волокнистых теплоизоляционных материалов с полимерным связующим, а также материала на основе кварцевого аэрогеля. Долговечность теплоизоляционных материалов предлагается определять с использованием методики расчета кривой термической устойчивости полимерных композитов и органических материалов.

В период эксплуатации объекта для оценки эффективности применяемых теплоизоляционных материалов, необходим контроль за величиной фактических тепловых потерь.

По результатам, полученным в работе, можно выделить следующие рекомендации по повышению эффективности систем транспортирования тепло и энергоносителей энергетических комплексов:

1. С учётом реальной предельной температуры применения волокнистых теплоизоляционных материалов, содержащих полимерное связующее, а также учитывая изменение коэффициента теплопроводности материала при термической деструкции полимерного связующего, следует ограничить их использование на объектах с температурой изолируемой поверхности выше 250 °С.

2. При использовании волокнистых теплоизоляционных материалов, содержащих полимерное связующее, при температурах изолируемой поверхности выше 250 °С, следует проводить периодическое измерение фактических тепловых потерь. Так как производители теплоизоляционных материалов не раскрывают информацию по компонентному составу связующего, учитывая полученные результаты по долговечности теплоизоляционных материалов с полимерным связующим, при воздействии на них температур в диапазоне 220-400 °С, измерение фактических тепловых потерь следует проводить уже после первых 3 лет эксплуатации объекта.

3. Для оценки качества тепловой изоляции и измерения фактических тепловых потерь эксплуатирующихся паропроводов предлагается использовать методику, описанную в главе 2. Модель устройства для измерения плотности

теплового потока описана в главе 2.

4. При транспортировке теплоносителей с температурой 300-400 °С для трубопроводов с малым диаметром до 200 мм при организации нормативной тепловой защиты наибольшая экономическая эффективность может достигаться при использовании материалов с минимальной теплопроводностью, например материалов на основе кварцевого аэрогеля, несмотря на их наиболее высокую стоимость на рынке.

**Направления дальнейшей разработки темы исследования диссертационной работы.** Полученные результаты показывают, что волокнистые теплоизоляционные материалы, наиболее широко применяемые для изоляции высокотемпературных объектов, не могут обеспечить стабильность теплозащитных свойств на протяжении всего срока эксплуатации. В связи с чем перспективным направлением является разработка новых эффективных теплоизоляционных материалов с высокой предельной температурой применения, отвечающих требованиям эксплуатационной надежности и долговечности. Также учитывая необходимость дополнительных капитальных вложений при устранении сверхнормативных потерь, путем замены теплоизоляционной конструкции на участке, перспективным направлением является разработка мероприятий по снижению сверхнормативных потерь, не требующих замены теплоизоляционной конструкции.

**Основные материалы диссертации опубликованы в работах:**

*Статьи в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ:*

1. Базукова Э.Р., Ваньков Ю.В., Пономарев Р.А. Экономический эффект вариантов тепловой защиты трубопроводов энергетических комплексов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. №4 (56). С. 103-112.

2. Ваньков Ю.В., Базукова Э.Р., Якимов Н.Д., Шешуков Е.Г., Чичирова Н.Д. Исследование температурной деструкции теплоизоляции паропровода / Ю.В. Ваньков, Э.Р. Базукова, Н.Д. Якимов, Е.Г. Шешуков, Н.Д. Чичирова // Труды академэнерго. – 2019. – №4. – С. 98-108.

3. Базукова Э.Р., Ваньков Ю.В., Гапоненко С.О., Смирнов Н.Н. Исследование коэффициента теплопроводности изоляции из базальтового волокна при различных температурных режимах / Э.Р. Базукова, Ю.В. Ваньков, С.О. Гапоненко, Н.Н. Смирнов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2021. – №4. – С. 15-24.

4. Базукова Э.Р., Ваньков Ю.В. Тепловые потери паропроводов при ухудшении свойств изоляции в процессе эксплуатации [Электронный ресурс] / Э.Р. Базукова, Ю.В. Ваньков // Инженерный вестник Дона. – 2015. – №3. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3249>.

*Статьи в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science:*

5. Vankov Y., Bazukova E., Emelyanov D., Fedyukhin A., Afanaseva O., Akhmetova I., Berardi U. Experimental Assessment of the Thermal Conductivity of Basalt Fibres at High Temperatures. *Energies*. 2022; 15(8):2784. <https://doi.org/10.3390/en15082784>.

6. Bazukova, E., Vankov, Y. Increasing the reliability of thermal energy transportation systems taking into account forecasting the properties of thermal insulation during operation (2020) *E3S Web of Conferences*, 216, № 01078. DOI: 10.1051/e3sconf/202021601078.

7. Vankov, Yu.V., Bazukova, E.R., Gavrilov, A.S. Assessment of transport losses of heat at change of properties of thermal isolation (2019) *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 288 (1), № 012127. DOI: 10.1088/1755-1315/288/1/012127.

8. Saifullin E.R., Vankov, Yu.V., Bazukova, E.R, Maryashev A.V. Evaluation of heat transporting losses due to changes of insulation properties during operation (2018) *Journal of Physics: Conference Series*, 1058 (1), № 01206. DOI: 10.1088/1742-6596/1058/1/012061.

*Патент на полезную модель:*

9. Устройство для измерения плотности теплового потока / Э.Р. Базукова, Ю.В. Ваньков, С.О. Гапоненко, А.Р. Загретдинов, Е.В. Измайлова // пат. №204511 Рос. Федерация. №2021103464; заявл. 12.02.2021; опубл. 28.05.2021. Бюл.№ 16. 2 с.

*Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:*

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022660400. «Программа расчета срока службы и предельной температуры применения теплоизоляционных материалов из данных термогравиметрии разложения» / Э.Р. Базукова, Ю.В. Ваньков, Д.А. Емельянов, Т.Р. Абдуллин. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 23.05.2022г.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022663721. «Программа расчета долговечности теплоизоляционных материалов из данных термогравиметрии разложения» / Э.Р. Базукова, Ю.В. Ваньков, Д.А. Емельянов, Т.Р. Абдуллин. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19.07.2022г.

---

Подписано в печать 21.02.2023. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать ризографическая. Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100. Заказ № 2002/1.

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

---