

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Казанский государственный энергетический университет»

На правах рукописи



**Базукова Эльвира Раисовна**

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

Специальность: 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы

Диссертация на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Ваньков Юрий Витальевич

Казань 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	6
1 Возможные направления повышения эффективности энергетических комплексов. Оценка потенциала энергосбережения.....	15
1.1 Оценка энергоемкости экономики РФ. Оценка потенциала энергосбережения.....	15
1.2 Энергетические комплексы промышленных предприятий.....	18
1.3 Возможные пути повышения эффективности энергетических комплексов.....	20
1.4 Оценка потенциала энергосбережения при транспортировке высокотемпературных энергоносителей на примере предприятия шинной промышленности.....	24
1.5 Выводы по главе.....	29
2 Оценка эффективности применяемых теплоизоляционных материалов. Определение фактических тепловых потерь паропроводов.....	32
2.1 Классификация теплоизоляционных материалов. Анализ представленных на рынке теплоизоляционных материалов применяемых для изоляции объектов, транспортирующих высокотемпературные теплоносители.....	32
2.2 Требования нормативных документов при проектировании теплоизоляционных конструкций и выборе теплоизоляционных материалов.....	35
2.3 Существующие методы расчета эффективной теплопроводности волокнистых теплоизоляционных материалов.....	39
2.4 Исследования теплообмена в волокнистых теплоизоляционных материалах. Зависимость теплопроводности волокнистых теплоизоляционных материалов от плотности, температуры, диаметра волокон.....	46

2.5 Эффективность систем транспортирования тепло и энергоносителей. Оценка эффективности применяемых теплоизоляционных материалов.....	48
2.6 Оценка фактических тепловых потерь через тепловую изоляцию трубопроводов.....	51
2.7 Выводы по главе.....	58
3 Экспериментальные исследования изменения теплопроводности волокнистых изоляционных материалов при деградации структуры материала.....	61
3.1 Экспериментальная установка для исследования теплопроводности волокнистых теплоизоляционных материалов методом стационарного теплового режима на образцах цилиндрической формы .....	62
3.2 Экспериментальная установка для исследования теплопроводности волокнистых теплоизоляционных материалов методом стационарного теплового режима на плоских образцах.....	67
3.3 Оценка погрешности результатов измерений.....	69
3.3.1 Оценка погрешности прямых измерений температуры.....	69
3.3.2 Оценка погрешности прямых измерений плотности тепловых потоков.....	72
3.3.3 Расчет погрешности косвенных измерений коэффициента теплопроводности.....	74
3.4 Результаты экспериментального исследования теплопроводности волокнистых теплоизоляционных материалов. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры, а также от плотности материала.....	74
3.5 Влияние деградации структуры материала на изменение теплозащитных свойств.....	79
3.6 Выводы по главе.....	96

4	Определение термической устойчивости волокнистых теплоизоляционных материалов.....	98
4.1	Определение термической устойчивости материалов из результатов термогравиметрического анализа.....	101
4.2	Определение энергии активации. Изоконверсионные методы кинетического анализа.....	102
4.3	Термогравиметрический анализ тепловой изоляции.....	103
4.4	Результаты определения энергии активации.....	112
4.5	Результаты расчета термической устойчивости и термического индекса.....	117
4.6	Выводы по главе.....	121
5	Оценка экономического эффекта вариантов тепловой защиты трубопроводов энергетических комплексов.....	123
5.1	Методика оценки финансово-экономической эффективности от организации нормативной тепловой защиты трубопроводов. Сравнительная экономическая оценка теплоизоляционных материалов.....	123
5.1.1	Чистый дисконтированный доход.....	124
5.1.2	Индекс доходности дисконтированных инвестиций (ИДД).....	125
5.1.3	Критерии сравнительной экономической оценки потенциальной эффективности теплоизоляционных материалов.....	126
5.2	Выбор материала, обеспечивающего наибольший экономический эффект при организации тепловой защиты паропроводов.....	129
5.3	Выводы по главе.....	136
	Заключение.....	138
	Список литературы.....	142
	Приложения.....	156
	Приложение 1. Акты использования и реализации .....	156
	Приложение 2. Патент на полезную модель .....	158
	Приложение 3. Результаты термогравиметрического анализа .....	159

Приложение 4. Термограммы исследуемых материалов .....	167
Приложение 5. Изменение степени конверсии исследуемых образцов .....	173
Приложение 6. Результаты кинетического анализа .....	180
Приложение 7. Энергия активации при различных степенях конверсии ....	184
Приложение 8. Результаты расчета термической устойчивости для исследуемых материалов .....	188
Приложение 9. Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ .....	189

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность темы исследования**

Повышению энергоэффективности уделяется особое внимание как одному из главных направлений повышения эффективности экономики страны [1, 2].

В энергетической стратегии Российской Федерации отмечается, что уровень энергоемкости производства важнейших промышленных продуктов выше среднемировых в 1,2-2 раза, а по отношению к лучшим мировым практикам - в 1,5 - 4 раза [1].

Энергоэффективность экономики оценивается через удельный показатель потребления энергоресурсов по отношению к валовому внутреннему продукту – энергоемкость ВВП.

Очевидна связь между удельной энергоемкостью выпускаемой продукции, энергоёмкостью ВРП и энергоемкостью ВВП Российской Федерации.

Без снижения удельной энергоемкости выпускаемых промышленных продуктов невозможно добиться запланированных в энергетической стратегии показателей по снижению энергоемкости ВВП Российской Федерации.

Промышленностью РФ на технологические нужды потребляется половина всей произведенной тепловой энергии, а для регионов, на территории которых сосредоточены производства энергоемких отраслей таких как металлургия, нефтепереработка, нефтехимия и др., потребление тепловой энергии может составлять 60-70%.

В связи с высокой удельной энергоемкостью выпускаемой продукции, сравнительно с зарубежными аналогами, промышленность РФ имеет значительный потенциал энергосбережения. Особенно актуальна данная проблема для регионов с преобладанием в отраслевой структуре ВРП энергоемких отраслей промышленности.

Промышленностью на технологические нужды производства в большом количестве потребляется пар различных параметров. Доля расхода теплоты на технологию в общем годовом расходе теплоты для предприятий

нефтеперерабатывающей промышленности 90-97%, шинной промышленности – 70-80%, химической – 70-75%.

Для многих крупных промышленных предприятий энергоемких отраслей промышленности, имеющих разветвленную и сложную систему сетей теплоэнергоснабжения, как внутреннюю, так и внешнюю, где в больших объемах потребляются высокотемпературные теплоносители, перспективными являются мероприятия по повышению энергетической эффективности, направленные на снижение тепловых потерь при транспортировке энергоносителей.

Еще по состоянию на 1995 год в топливно-энергетическом комплексе потенциал экономии тепловой энергии при транспортировке оценивался в 110-135 млн Гкал. По состоянию на 2003 год специалистами научно-исследовательского центра АО «Теплопроект» отмечается, что сверхнормативные потери через изолированную поверхность промышленных сооружений, оборудования и трубопроводов достигает 244 млн Гкал или 44 млн т.у.т в год.

Однако и по состоянию на 2016 год в прогнозе научно-технического развития отраслей ТЭК России на период до 2035 года по прежнему отмечается, что техническое состояние теплосетевого хозяйства страны является близким к критическому, а объем реконструкции и реновации не приводят к существенному снижению тепловых потерь, связанных в том числе и с неэффективной тепловой изоляцией [3].

Также отмечается [3], что снижение тепловых потерь при транспортировке теплоносителя применением эффективных теплоизоляционных материалов является перспективным направлением в вопросе снижения энергоемкости технологии добычи тяжелой и вязкой нефти типа SAGD (Steam-Assisted Gravity Drainage – стимулируемый паром самотечный дренаж).

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- и энергоносителей на действующих объектах в условиях эксплуатации.

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

Много работ посвящено проблеме снижения теплозащитных свойств изоляционных материалов в процессе эксплуатации под влиянием различных эксплуатационных факторов таких как увлажнение изоляционного слоя, циклическое воздействие знакопеременных температур, механические нагрузки и др. Однако на увеличение тепловых потерь в процессе эксплуатации оказывает влияние не только увлажнение теплоизоляционного слоя, а также изменение структуры материала, его физическая деградация.

Теплоизоляционные материалы, применяемые в настоящее время для изоляции высокотемпературных объектов, обладают достаточно низкими значениями теплопроводности позволяющими добиться минимума тепловых потерь. Однако 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.

В связи с вышеизложенным к проблеме снижения тепловых потерь при транспортировке тепло- и энергоносителей необходимо подходить комплексно и обеспечивать:

- выбор эффективных теплоизоляционных материалов обеспечивающих стабильность теплозащитных свойств в течении всего срока эксплуатации;



- контроль за величиной фактических тепловых потерь.

### **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 др.

Исследованиями процессов совместного тепло- и массообмена в капиллярно-пористых телах занимались А.В. Лыков, О.Е. Власов, Г.А. Максимов, О. Кришер 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 и 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 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, обеспечивающие стабильность теплозащитных свойств, 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.

Акты внедрения, использования и реализации результатов исследований представлены в Приложении 1.

### **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 гг.);

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 энергоэффективности (ТЭФ) – 2022 (Казань, 2022 г.);

Международная научно-практическая конференция «Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2022» (Ялта, 2022 г.).

# 1 ВОЗМОЖНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ. ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

## 1.1 Оценка энергоемкости экономики РФ. Оценка потенциала энергосбережения

Распоряжением правительства РФ от 09.06.2020 г была утверждена «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года». Согласно данному документу [1] в Российской Федерации имеется потенциал энергосбережения, достигающий третьей части текущего энергопотребления, и существуют возможности значительного повышения экономической эффективности проектов в сфере энергетики. Уровни энергоемкости производства важнейших отечественных промышленных продуктов выше (хуже) среднемировых в 1,2 - 2 раза, а по отношению к лучшим мировым практикам – в 1,5 - 4 раза.

Повышению энергоэффективности уделяется особое внимание как одному из главных направлений повышения эффективности экономики страны [2]. Подчеркивается, что понятие энергетической эффективности более широкое чем энергосбережение.

По оценкам министерства экономического развития РФ энергоемкость ВВП Российской Федерации по итогам 2018 г. превысила среднемировой уровень на 46%, на 44% уровень США и на 62% – европейский уровень.

Отмечается [4], что при существующем среднем темпе снижения энергоемкости ВВП равному 1,1 % в год, снизить энергоемкость на 40% (относительно 2007 г.) возможно только к 2043 г.

Темпы снижения энергоемкости ВВП будут зависеть от следующих факторов:

- технологический фактор (энергоэффективность) – изменение энергоэффективности за счет модернизации технологической базы и внедрения новых технологий;

- структурный фактор – влияние структурных сдвигов между секторами потребления энергии за счет неравномерности развития этих секторов (т.е. перераспределение объемов потребления энергии между более энергоемкими и менее энергоемкими секторами и подсекторами).

Спрогнозировано [4] несколько возможных сценариев снижения энергоемкости ВВП в зависимости от преобладающего влияния перечисленных выше факторов. Наиболее оптимистичные прогнозы снижения энергоемкости ВВП за счет вклада технологического фактора (в зависимости от уровня повышения энергоэффективности технологической базы) от 22% до 40 %. При сохранении энергоэффективности на текущем уровне снижение энергоемкости ВВП составит к 2035 г. не более 21 % (вклад технологического фактора 2%, структурные изменения 19 %).

Следует отметить, что некоторые исследователи [5-7] считают намеченные в энергетической стратегии России на период до 2035 г. (ЭС-35) целевые ориентиры по снижению энергоемкости ВВП принципиально недостижимыми даже при абсолютном выполнении всех отраслевых программ по энергосбережению и энергетической эффективности, заявленных в ЭС-35.

Характер энергопотребления регионов обусловлен производственной специализацией, регионы отличающиеся высокой долей промышленности в отраслевой структуре ВРП объективно являются более энергоемкими.

По разным оценкам потенциал энергосбережения экономики РФ составляет от 45 до 55%. [1, 8-11].

Основные направления с наибольшим потенциалом энергосбережения в России: топливно-энергетический комплекс, промышленность, жилищно-коммунальный сектор.

Потребление энергии в промышленности России составляет сегодня более 40 % от всего потребления энергии. В некоторых регионах — более 60-70 %. Такое относительно высокое энергопотребление обусловлено наличием на территории регионов энергоемких производств (металлургия, нефтепереработка, нефтехимия и др.) [5].



«Впервые суммарный потенциал энергосбережения в России был опубликован в Энергетической стратегии России и оценен по состоянию на 1995 г. в 350-460 млн. т.у.т. или порядка 2/5 всего объема потребления первичных энергетических ресурсов» [8]. При этом на транспорт тепловой энергии в топливно-энергетическом комплексе – 110-135 млн. Гкал, треть от общего потенциала экономии тепловой энергии. В промышленности потенциал экономии тепловой энергии оценивался в 120-160 млн. Гкал, при этом максимальные значения 55-70 млн. Гкал отводились на общепромышленные мероприятия без учёта специфики отрасли.

На технологические нужды промышленности потребляется половина всей произведенной тепловой энергии в РФ, другая половина идет на покрытие коммунально-бытовых нагрузок потребителей [4].

Крупнейшими потребителями тепловой энергии являются предприятия химической, нефтехимической, топливной, металлургической, машиностроительной, обрабатывающей и пищевой промышленности. Технологические комплексы отраслей химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей отраслей промышленности потребляют 21% всей производимой тепловой энергии [12].

Такие предприятия характеризуются высокой удельной энергоемкостью выпускаемой продукции. Причины высокого удельного расхода топлива и энергии на производствах энергоемких отраслей промышленности связаны с многостадийностью производства, регламентными ограничениями режимов ведения технологического процесса, сложной структурой взаимосвязей технологического оборудования.

Регионы РФ с преобладанием в отраслевой структуре ВРП энергоемких отраслей промышленности имеют высокий потенциал энергосбережения [13-15].

Если рассматривать структуру производства промышленной продукции Приволжского федерального округа в аспекте энергоемкости, то на долю химической и нефтехимической промышленности приходится 11,2 %; топливной промышленности – 26% [16].

Для отдельных субъектов ПФО доля, приходящаяся на энергоемкие отрасли, которые потребляют значительное количество тепловой энергии, в общей структуре производства промышленной продукции, достаточно велика.

Доли химической и нефтехимической промышленности в структуре производства промышленной продукции для отдельных субъектов ПФО распределены следующим образом: Республика Татарстан – 17,3 %, Кировская область – 20,2 %, Самарская область – 11,7 %, Саратовская область – 13,9 %. Доли топливной промышленности для отдельных субъектов ПФО распределены следующим образом: Республика Башкортостан – 58 %, Республика Татарстан – 38,9 %, Удмуртская Республика – 26 %; Оренбургская область – 45,7 %, Пермский край – 23,7% [16].

## **1.2 Энергетические комплексы промышленных предприятий**

Энергетический комплекс является элементом инфраструктуры промышленного предприятия, обслуживающим основное производство. В состав энергетического комплекса входят подсистемы энергоснабжения и энергопотребления.

Система теплоэнергоснабжения промышленного предприятия включает в себя [17]:

- сооружения и установки, обеспечивающие прием, трансформацию и аккумуляцию энергоресурсов и энергоносителей от общегосударственных или районных энергосистем;

- энергетические станции и установки предприятия для централизованной выработки остальных необходимых потребителям предприятия энергоресурсов и энергоносителей, их трансформации и аккумуляции: ТЭЦ, котельные, насосные, компрессорные, воздухоразделительные станции и т.д.;

- утилизационные установки и станции, производящие энергоносители за счет использования вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) технологического комплекса предприятия: утилизационные ТЭЦ, котлы-утилизаторы (КУ),

установки по очистке и повторному использованию сточных вод, по улавливанию и очистке горючих отходов технологических процессов;

- трубопроводные и иные подсистемы, обеспечивающие транспортировку к потребителям предприятия и распределение между ними энергоносителей и энергоресурсов, произведенных его энергетическими станциями и утилизационными установками, а также полученных из общегосударственных или районных энергосистем.

Системы теплоснабжения промышленных предприятий предназначены для обеспечения потребностей производства в водяном паре различных параметров и горячей воде. Пар используется преимущественно на нужды технологии, а горячая вода – для покрытия санитарно-технических нагрузок.

По количеству потребляемого пара к крупным промышленным предприятиям относятся металлургические, химические комплексы, мощные машиностроительные заводы.

В зависимости от специфики производства различным технологическим потребителям требуется пар различных параметров. Давление в системах промышленного пароснабжения колеблется в пределах от 0,6 – 1,4 до 3-4 МПа, а в отдельных случаях достигает 9 МПа. Наиболее распространенным является давление 0,6-0,8 МПа.

Промышленные предприятия получают перегретый пар в основном от внешних источников (ТЭЦ, а также от крупные центральные котельные).

В структуре теплоснабжения предприятий химической и нефтехимической промышленности до 2/3 всей тепловой энергии поставляется от внешних централизованных источников, 1/3 поступает от собственных источников предприятий (заводские ТЭЦ, котельные, утилизационные установки) [12].

В крупных производственных комплексах выпуск продукции может осуществляться на различных предприятиях, которые располагаются на значительном удалении друг от друга. Такие системы имеют протяженную и разветвленную систему транспортировки и распределения энергоносителей между потребителями предприятия.

Системы технологического пароснабжения промышленных предприятий классифицируются по следующим признакам [18]:

- по основному источнику пароснабжения: ТЭЦ, центральные или местные котельные;
- по объему потребления пара: малое – до 6 кг/с; средние 6-20 кг/с; большое – более 20 кг/с;
- по состоянию пара на входе в распределительную паровую сеть предприятия: низкое – менее 0,3 МПа; среднее – от 0,3 до 0,9 МПа; повышенное – от 0,9 до 1,5 МПа и высокое – более 1,5 МПа
- по сложности паровой сети: протяженность, разветвленность и пр.;
- по организации систем сбора и возврата конденсата: закрытые и открытые;
- по структуре теплотребления: с преобладанием технологических или санитарно-технических нагрузок;
- по характеру графика теплотребления в течение рассматриваемого периода: с резкими подъемами и падениями или равномерный.

В структуре теплоэнергетических систем промышленных предприятий можно выделить три основные части:

- источник – совокупность промышленных агрегатов и технологических процессов, производящих энергию;
- системы транспорта и распределения энергетических ресурсов;
- потребители энергетических ресурсов.

Эффективность использования топливно-энергетических ресурсов зависит от эффективного взаимодействия каждой из перечисленных частей.

### **1.3 Возможные пути повышения эффективности энергетических комплексов**

В вопросах повышения энергетической эффективности можно выделить две взаимосвязанные проблемы – проблему энергообеспечения и проблему энергосбережения. Две взаимосвязанные проблемы энергообеспечение-энергосбережение имеют как глобальные стратегические вопросы, связанные с

уровнем добычи топлив, уровнем потерь энергии, КПД источников энергоснабжения, так и тактические, связанные с разработкой конкретных энергосберегающих технологий, вопросами учёта, контроля и управления энергоресурсами, использованием утилизационных технологий, а также возобновляемых источников энергии [8].

Экономия ТЭР на промышленном предприятии может быть организована в двух направлениях [19]:

- совершенствование энергоснабжения;
- совершенствование энергоиспользования.

В первом случае могут быть выделены следующие мероприятия:

- правильный выбор энергоносителей (выбор теплоносителя, обеспечивающего наибольший энергетический и экономический эффект);
- уменьшение числа преобразований энергии (каждое преобразование энергии связано с потерями, чем меньше последовательных преобразований претерпевает энергия, тем выше общий КПД);
- разработка рациональных схем энергоснабжения;
- автоматизация энергоснабжающих установок;
- повышение качества энергоресурсов (изменение параметров энергоресурсов приводит к ухудшению качества продукции и перерасходу энергоресурсов).

Во втором случае выделяют следующие мероприятия:

- внедрение технологических процессов и техники с улучшенными энерготехнологическими характеристиками;
- совершенствование действующих технологических процессов, модернизация и реконструкция оборудования;
- повышение степени использования ВЭР;
- утилизация низкопотенциального тепла;
- организационно-технические мероприятия.

В научной литературе встречается разделение возможных энергосберегающих мероприятий в теплотехнологии на три группы [20, 21]:

- утилизационные (использование отходов тепла потенциальной энергии в действующих теплотехнологических установках и системах);

- энергетической модернизации (снижение отходов тепла, энергии в действующих теплотехнологических установках и системах без изменения принципиальных основ технологии, техники, управления, использования технологических продуктов);

- интенсивного энергосбережения (изменение принципиальных основ применяемых технологий, техники, систем управления).

Существует несколько путей повышения эффективности использования энергоресурсов, характеризующиеся разной величиной затрат материальных и временных [8]:

- мероприятия организационно-технического порядка, не связанные с использованием нового оборудования и дополнительных затрат (контроль за состоянием оборудования, соблюдение оптимальных режимов его эксплуатации, тарифная политика, поощрение деятельности по энергосбережению);

- мероприятия связанные с модернизацией оборудования, требующие небольших капитальных затрат и которые могут быть выполнены силами самих предприятий;

- мероприятия, связанные с реконструкцией производства и внедрением технически прогрессивных энергосберегающих технологий, которые связаны с большими капитальными затратами.

Последние мероприятия дают наивысший эффект, однако связаны с чрезвычайно высокими капитальными затратами, окупаемость которых в ближайшей перспективе сопряжена с известным коммерческим риском [12].

В качестве примера можно привести мероприятия, представленные в государственном докладе о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации за 2020 год [22]. Так, например, повышение энергетической эффективности глиноземного производства «РУСАЛ Каменск-Уральский» (сектор обрабатывающая промышленность) с эффектом от внедрения в виде снижения удельного расхода тепловой энергии с

19,5 до 17,8 ГДж/т, стоимость реализации оценена в 1340 млн руб., а ожидаемый срок окупаемости – 5 лет. Ещё один пример: повышение эффективности использования тепловой энергии в ПАО «Казаньоргсинтез» с вводом в эксплуатацию четырехкамерной печи пиролиза «Текнип» на установке «Этилен-200» ПАО «Казаньоргсинтез» (сектор добывающая промышленность) с годовым экономическим эффектом 178 млн руб. от увеличения выработки собственного пара на 40 т/ч. Стоимость реализации – 3611 млн руб.

Реализация мероприятий, направленных на использование ВЭР, затрудняется по следующим причинам (и не всегда могут быть внедрены) [23]:

- неравномерность выхода ВЭР на предприятии;
- необходимость резервирования тепловой энергии и установки буферного оборудования для сглаживания возникающих дисбалансов в потреблении;
- высокие материальные затраты на создание разветвленной утилизационной системы, объединяющей множество элементов оборудования.

Следует отметить, что с учетом специфики производств в различных отраслях промышленности действующие предприятия не всегда могут организовать реконструкцию производства с изменением принципиальных основ технологии и техники в связи с возможными снижениями производственной мощности, связанными с коммерческим риском, а также с учетом существующего уровня развития техники и технологий в отрасли.

Для таких предприятий в вопросах повышения энергетической эффективности возможные пути решений связаны с энергосберегающими мероприятиями, не изменяющими принципиальных основ технологии, не требующими переоборудования и переустройства производства, а также с совершенствованием энергоснабжения.

Так, например, в государственном докладе о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации за 2021 год приводится пример реализации мероприятий компанией ПАО «РусГидро» по восстановлению тепловой изоляции на тепло- паротрассах г. Владивостока с применением инновационных технологий и материалов [24]. Ожидаемые эффекты

от внедрения: снижение потерь тепловой энергии при транспортировке теплоносителя – 17301 Гкал в год; экономия в стоимостном выражении – 14,6 млн. руб. в год. Стоимость реализации – 31 млн руб.

Для многих крупных промышленных предприятий энергоемких отраслей промышленности, имеющих разветвленную и сложную систему теплоэнергоснабжения, как внутреннюю, так и внешнюю, где в больших объемах потребляются высокотемпературные теплоносители, перспективными являются мероприятия по повышению энергетической эффективности, направленные на снижение тепловых потерь при транспортировке энергоносителей.

#### **1.4 Оценка потенциала энергосбережения при транспортировке высокотемпературных энергоносителей на примере предприятия шинной промышленности**

В рамках НИОКР при участии сотрудников кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» ФГБОУ ВО «КГЭУ» была проведена работа по оценке потерь тепловой энергии при транспортировке энергоносителей до потребителей группы заводов шинного комплекса г. Нижнекамск [25].

Структура потребления ТЭР по видам ресурсов и направлениям использования за 2019 год: тепловая энергия 78 %; электрическая энергия 22 %.

Структура потребления ТЭР на основное производство:

- тепловая энергия 88 %;
- электрическая энергия 12%.

Собственных источников тепловой энергии предприятие не имеет. Тепловая энергия для нужд предприятия подается от стороннего источника – филиала ОАО «ТГК-16» «Нижнекамская ТЭЦ». Потребление водяного пара осуществляется непрерывно (круглогодично и круглосуточно), потребление теплофикационной воды производится только в отопительный сезон.

Тепловая энергия на предприятии потребляется в следующем виде: водяной пар 30 кгс/см<sup>2</sup>; водяной пар 15 кгс/см<sup>2</sup>; теплофикационная вода.



Основная доля потребления тепловой энергии приходится на водяной пар, расходуемый на технологические нужды производства. Суммарный расход по пару – 230 т/ч. Водяной пар 30 кгс/см<sup>2</sup> подается по двум паропроводам диаметром 377x8 мм каждый. Водяной пар 15 кгс/см<sup>2</sup> подается по двум паропроводам диаметром 630x9 мм каждый.

Были определены значения нормативных и фактических тепловых потерь для двух трубопроводов транспортирующих перегретый пар с начальным давлением 30 кгс/см<sup>2</sup> и температурой 315 °С.

Схема пароснабжения паром «30» от Нижнекамской ТЭЦ-1 до объектов шинного комплекса ПАО «Татнефть», с указанием участков, представлена на рисунке 1.1. Результаты расчетов представлены в таблице 1.1



Рис.1.1 Схема пароснабжения паром «30» от Нижнекамской ТЭЦ-1 до объектов шинного комплекса ПАО «Татнефть»

Были определены значения нормативных и фактических тепловых потерь для двух трубопроводов транспортирующих перегретый пар с начальным давлением 15 кгс/см<sup>2</sup> и температурой 270 °С, диаметром 630×9, тип прокладки надземный.

Схема пароснабжения паром «15» от Нижнекамской ТЭЦ-1 до объектов шинного комплекса ПАО «Татнефть» с указанием участков, представлена на рисунках 1.2-1.3. Результаты расчетов представлены в таблицах 1.2-1.3.

Таблица 1.1 Нормативные и фактические тепловые потери паропроводов «пар 30»

№ участка	Фактический удельный тепловой поток $q$ , ккал/(ч·м)	Нормативные значения удельного теплового потока $q_n$ , ккал/(ч·м)	Количество паропроводов	Протяженность участка, м	Оценка сверхнормативных потерь	
					Гкал/год	тыс.руб.
1-2	206,2	186	2	1890	667,4	528,818
2-3	201,5	183	2	40	13	10,258
3-4	172,4	182	2	510	-	-
2-5	192,1	177	2	2070	547,8	433,99
5-6	162,2	171	2	280	-	-
6-7	229,3	150	1	720	500,3	396,406
<b>Всего:</b>					<b>1728,5</b>	<b>1369,47</b>



Рис.1.2 Схема пароснабжения паром «15» от Нижнекамской ТЭЦ-1 до объектов шинного комплекса ПАО «Татнефть»



Рис.1.3 Схема пароснабжения паром «15» объектов шинного комплекса (по территории ПАО «Нижнекамскшина»)

Таблица 1.2 Нормативные и фактические тепловые потери паропроводов «пар 15» (от Нижнекамской ТЭЦ-1 до объектов шинного комплекса ПАО «Татнефть»)

№ участка	Фактический удельный тепловой поток $q$ , ккал/(ч·м)	Нормативные значения удельного теплового потока $q_n$ , ккал/(ч·м)	Количество паропроводов	Протяженность участка, м	Оценка сверхнормативных потерь	
					Гкал/год	тыс.руб.
1-2	231,0	218	2	1890	430,8	341,272
2-3	191,3	188	2	550	31,6	25,088
2-4	183,6	181	2	2350	106,8	84,66
<b>Всего:</b>					<b>569,2</b>	<b>451,018</b>

Таблица 1.3 Нормативные и фактические тепловые потери паропроводов «пар 15» (по территории ПАО «Нижнекамскшина»)

№ участка	Фактический удельный тепловой поток $q$ , ккал/(ч·м)	Нормативные значения удельного теплового потока $q_n$ , ккал/(ч·м)	Количество паропроводов	Протяженность участка, м	Оценка сверхнормативных потерь	
					Гкал/год	тыс.руб.
1-2	272,8	159	1	1000	997,1	789,942
2-3	111,2	81	1	230	60,8	48,174
2-4	255,1	147	1	165	156,2	123,768
2-5	185,2	117	1	550	328,5	260,249
6-7	213,8	128	1	720	541,0	428,635
<b>Всего:</b>					<b>2083,6</b>	<b>1650,768</b>

С учетом сложности, разветвленности и протяженности систем транспортирования тепловой энергии по территории комплекса шинных заводов, транспортные потери определялись на наиболее крупных участках (выделенные участки на рисунках 1.1-1.3), а также без учёта внутрицеховых систем распределения энергоносителей. При этом на участках суммарной протяженностью 7380 м замена тепловой изоляции производилась в 2017-2018гг. (участки от ТЭЦ-1 до территории ПАО «Нижнекамскшина», выделены желтым и синим цветом на рисунках 1.1-1.2).

Значения фактических потерь тепловой энергии на рассмотренных участках представлены на рисунке 1.4.

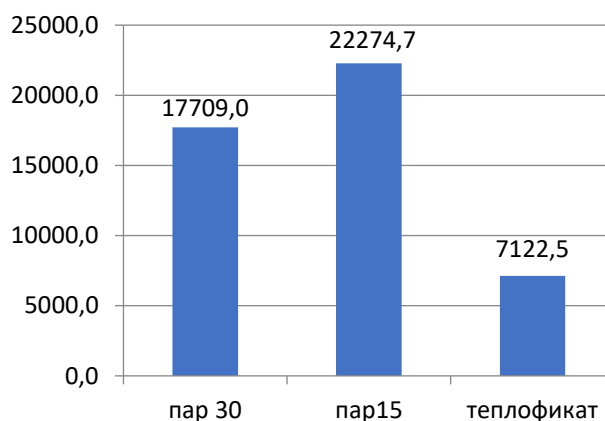


Рис. 1.4 Фактические тепловые потери на рассмотренных участках в действующей схеме (от ТЭЦ-1) за год, Гкал/год

По результатам проведенного анализа было предложено произвести замену тепловой изоляции на участках, где наблюдаются значительные сверхнормативные удельные тепловые потери (таблица 1.4, рисунок 1.5).

Таблица 1.4 Участки со сверхнормативными тепловыми потерями

Участок	Длина участка, м	Превышение нормативных значений, %	Фактические тепловые потери на участке $Q$ , Гкал/год	Тепловые потери за год по нормативным значениям, Гкал/год
6-7 (пар 30, рис. 1)	720	52,9	1446,4	946,1
1-2 (пар 15, рис. 3)	1000	71,6	2389,9	1392,8
2-3 (пар 15, рис. 3)	230	37,3	224,0	163,2
2-4 (пар 15, рис. 3)	165	73,5	368,7	212,5
2-5 (пар 15, рис. 3)	550	58,3	892,2	563,7
6-7 (пар 15, рис. 3)	720	67,0	1348,3	807,3
<b>Итого</b>	<b>3385</b>		<b>6669,6</b>	<b>4085,6</b>

Расчеты нормативных тепловых потерь проводились по методике, представленной в приказе министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 г. № 325 «Об утверждении порядка определения нормативов технологических потерь при передаче тепловой энергии, теплоносителя», а так же по методике, представленной в СНиП 41-03-2003 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов» (актуализированная редакция СП 61.13330.2012). Нормы тепловых потерь (плотности теплового потока) определялись с учетом года ввода паропроводов в эксплуатацию.

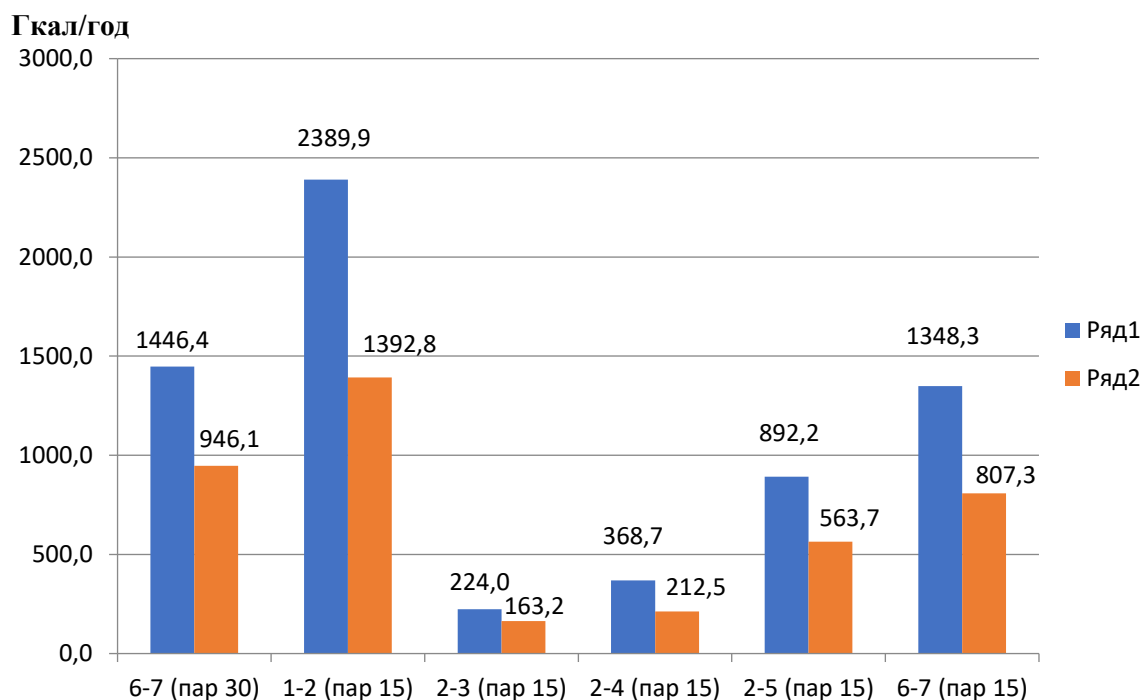


Рис. 1.5 Тепловые потери на участках за год. Ряд 1 – фактические тепловые потери на участке, Гкал/год; ряд 2 – тепловые потери за год по нормативным значениям, Гкал/год

Фактические значения тепловых потерь определялись с учётом результатов экспериментальных исследований по определению коэффициента теплопроводности для образцов теплоизоляционных материалов бывших в эксплуатации и используемых для изоляции паропроводов на объектах шинного комплекса ПАО «Татнефть» (см. гл.3).

### 1.5 Выводы по главе

1. Правительством РФ и профильными министерствами констатируется превышение энергоёмкости ВВП Российской Федерации по отношению к среднемировому уровню на 46 %.

2. Промышленностью потребляется половина всей произведенной тепловой энергии в РФ. Для регионов с высокой долей энергоёмких производств (металлургия, нефтепереработка, нефтехимия и др.) – 60-70 %.

3. Для Республики Татарстан в структуре производства промышленной продукции на энергоемкие отрасли (химическая, нефтехимическая промышленность; топливная промышленность) приходится 56,2%.

4. Показано на примере заводов шинного комплекса г. Нижнекамск, что на предприятиях энергоемких отраслей промышленности в больших объемах потребляется тепловая энергия в виде высокотемпературных энергоносителей. Для рассматриваемых заводов шинного комплекса в структуре потребления ТЭР на основное производство 88% приходится на тепловую энергию, причем основная часть — это перегретый пар высокого давления.

5. Обозначены возможные пути повышения эффективности энергетических комплексов. Наибольший эффект дают мероприятия, связанные с реконструкцией производства и внедрением технически прогрессивных энергосберегающих технологий. Однако, действующие предприятия не всегда могут организовать реконструкцию производства с изменением принципиальных основ технологии и техники в связи с возможными снижениями производственной мощности, связанными с коммерческим риском, а также с учетом существующего уровня развития техники и технологий в отрасли.

Энергосберегающие мероприятия, не изменяющие принципиальных основ технологии не требующие переоборудования и переустройства производства, а также связанные с совершенствованием энергоснабжения, являются универсальными и не зависят от специфики технологического процесса предприятий.

6. Для многих крупных промышленных предприятий энергоемких отраслей промышленности, имеющих разветвленную и сложную систему теплоэнергоснабжения, как внутреннюю, так и внешнюю, где в больших объемах потребляются высокотемпературные теплоносители, перспективными являются мероприятия по повышению энергетической эффективности, направленные на снижение тепловых потерь при транспортировке энергоносителей.

7. При проведении анализа фактических тепловых потерь сети пароснабжения, проходящей по внутривозводской территории, имеющей

наибольший износ тепловой изоляции, рассматривались только наиболее протяженные участки и не учитывались внутрицеховые трубопроводы.

8. 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.

## **2 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЯЕМЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ПАРОПРОВОДОВ**

### **2.1 Классификация теплоизоляционных материалов. Анализ представленных на рынке теплоизоляционных материалов применяемых для изоляции объектов, транспортирующих высокотемпературные теплоносители**

Теплозащитные свойства теплоизоляционных материалов связаны с особенностями их строения. Все теплоизоляционные материалы представляют собой разнообразные газонаполненные системы. В зависимости от особенностей формирования газовая фаза заключена в ячейки полностью или частично изолированные либо сообщающиеся между собой [27].

Считается, что вместо понятия «ячейка» корректнее использовать более универсальное морфологическое понятие – газоструктурный элемент (ГСЭ).

В соответствии с этим в [27] приводится разделение известных газонаполненных материалов на следующие типы:

- Ячеистые (или пенистые), содержащие изолированные ГСЭ.
- Пористые, содержащие сообщающиеся ГСЭ.

Частным случаем поропластов являются ретикулярные поропласты, в которых отсутствуют стенки ячеек, и вся полимерная фаза сосредоточена на ребрах ячеек; такие материалы называются «абсолютными поропластами».

- Микробаллонные, или синтактные, ГСЭ которых представляют собой газовую фазу, заключенную в сферическую оболочку из монолитного материала, а твердая фаза состоит из этой оболочки (полимерной или минеральной породы) и межсферического пространства, заполненного полимером.

- Сотовые пластики (сотопласты), ГСЭ которых состоят из газовой фазы, заключенной в объем правильного многогранника, а твердая фаза представлена двумя материалами, например, гранями из бумаги или ткани и полимерного связующего.



- Капиллярные, или волокнистые, ГСЭ которых состоят из газовой фазы, заключенной в объем анизометричной формы, который образован элементарными нитеобразными структурами, закрепленными механически или с помощью связующего.

- Пеноматериалы со смешанным типом ГСЭ.

В работе [27] представлена классификация предлагающая разделять все существующие типы пористых и ячеистых тел разнообразных газонаполненных систем с позиции их структурных особенностей по следующим признакам:

1) Механизм образования (происхождения). Здесь выделяют системы роста (системы, которые формируются благодаря процессам диспергирования сплошной среды, либо образуются в результате химических реакций). К ним относятся следующие пористые материалы естественного или искусственного происхождения: пемза, коксы, цеолиты, ячеистый бетон, пеностекло и большинство видов газонаполненных пластмасс. Вторая группа, называемая системами сложения – это пористые материалы, образующиеся в результате случайного соединения большого числа отдельных элементов. Относятся к системам сложения, как естественного, так и искусственного происхождения; например, песок, порошки, асбест, стекломинераловолокнистые материалы, полистиролбетоны, а также особый тип газонаполненных пластмасс – так называемые синтактные пены. Третья группа – это комбинированные системы, получаемые сочетанием систем сложения и роста. К таким системам относятся продукты спекания глин и керамических масс; асбестоизвестково-кремнеземные изделия; газонаполненные пластмассы, изготавливаемые на основе предварительно вспененных гранул, в частности, полистирола; ячеистое стекло, получаемое путем спекания предварительно отформованных из вспененных масс изделий.

2) Характер упорядоченности структуры. Этот признак отражает процессы структурообразования и позволяет разделить пористые материалы на системы с четко упорядоченной и неупорядоченной структурами.

На практике используют классификацию в соответствии с ГОСТ 4.201 [28].

По виду исходного сырья теплоизоляционные материалы делятся на неорганические (пеностекло, пенокерамика, ячеистый бетон, минеральная и стеклянная вата, изделия на основе вспученного перлита и вермикулита и др.) и органические (древесноволокнистые и торфяные теплоизоляционные плиты, камышит, газонаполненные пластмассы и др.).

По форме различают штучные (плиты, блоки, кирпич, цилиндры, сегменты и др.), рулонные (маты, полосы, матрацы), шнуровые и сыпучие материалы.

По структуре их разделяют на пористоволокнистые (минераловатные, стекловатные, асбесто- и древесноволокнистые); пористозернистые (перлитовые, вермикулитовые, известково-кремнеземистые и др.); ячеистые (пеностекло, пенобетон, газонаполненные пластмассы).

По сжимаемости при нагрузке 0,02 МПа различают мягкие (сжимающиеся более, чем на 30 %); полужесткие (на 6-30 %) и жесткие – (до 6 %); повышенной жесткости с деформацией до 10 % толщины при нагрузке 0,04 МПа; твердые – до 10 % при нагрузке 0,1 МПа.

По средней плотности их объединяют в три группы: особо легкие (от 15 до 100 кг/м<sup>3</sup>), легкие (125-350 кг/м<sup>3</sup>) и тяжелые (400-600 кг/м<sup>3</sup>).

По теплопроводности различают материалы малопродные, с коэффициентом теплопроводности до 0,058 Вт/(м·К); среднепродные – 0,058-0,116 Вт/(м·К) и повышенной теплопроводности – не более 0,18 Вт/(м·К).

По горючести разделяют на негорючие (НГ), слабогорючие (Г1), умеренногорючие (Г2); нормальногорючие (Г3), сильногорючие (Г4).

Не смотря на рост производства и применения газонаполненных пластмасс в России, структура общего объема производства теплоизоляционных материалов меняется несущественно [29-31]. Подавляющая часть (около 70%) приходится на изделия из минеральных и стеклянных волокон, что связано с широким температурным диапазоном применения волокнистых материалов, высокой предельной температурой применения, высокой огнестойкостью [27].

Применение газонаполненных пластмасс при их наиболее эффективной теплоизолирующей способности ограничено их достаточно низкой предельной температурой применения.

В работе [31] проанализированы характеристики наиболее распространенных современных теплоизоляционных материалов.

На сегодня для изоляции объектов, транспортирующих высокотемпературные тепло и энергоносители предпочтительными остаются волокнистые теплоизоляционные материалы из минеральных волокон (из расплава изверженных горных пород – каменная вата, из расплава доменного шлака – шлаковая вата, из расплава природного песка или стекла – стеклянная вата).

Так же следует отметить, относительно новые для Российского рынка – теплоизоляционные материалы из кремнеземного аэрогеля, применяемые в том числе и для изоляции высокотемпературных объектов.

Аэрогели относятся к классу мезопористых материалов (размер пор от 5-50 нм). Теплопроводность чистого кремнеземного аэрогеля при нормальных условиях составляет 0,015-0,018 Вт/м·К [32]. Для повышения механической прочности аэрогеля применяют армирование различными волокнами [33-39]. В большинстве случаев добавление волокон для улучшения механических свойств кремнеземистого аэрогеля может отрицательно сказаться на его теплопроводности, так теплопроводность кремнеземного аэрогеля, армированного волокнами арамида, минеральными волокнами, керамическими и стекловолокна, была увеличена до 0,023 Вт/м·К, 0,025 Вт/м·К, 0,041 Вт/м·К, 0,023 Вт/м·К и 0,024 Вт/м·К соответственно [33]. При армировании стекловолокном и углеродным волокном – 0,031 [36]. Также используют различные добавки для уменьшения лучистого теплообмена, например технический углерод или  $TiO_2$ ,  $ZrSiO_4$  [40].

## **2.2 Требования нормативных документов при проектировании теплоизоляционных конструкций и выборе теплоизоляционных материалов**

Проблему повышения эффективности систем транспортирования тепловой энергии необходимо решать комплексно, и уже на стадии проектирования

выбирать теплоизоляционные материалы с оптимальными свойствами, обеспечивающими минимальное значение величины тепловых потерь с учетом условий эксплуатации в течении всего требуемого срока.

Основные нормативные документы при проектировании тепловой изоляции оборудования и трубопроводов:

СНиП 41-03-2003 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов»;

СП 41-103-2000 «Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов».

В состав конструкции тепловой изоляции для поверхностей с положительной температурой в качестве обязательных элементов должны входить: теплоизоляционный слой; покровный слой; элементы крепления.

Расчёт требуемой толщины теплоизоляционного слоя может производиться для следующих условий [41, 42]:

- по нормированной плотности теплового потока;
- по заданной величине теплового потока;
- по заданному снижению (повышению) температуры вещества, транспортируемого трубопроводами (паропроводами);
- по заданному количеству конденсата в паропроводах;
- по заданному времени приостановки движения жидкого вещества в трубопроводах в целях предотвращения его замерзания или увеличения вязкости;
- по заданной температуре на поверхности изоляции.

Согласно [41] теплоизоляционная конструкция должна обеспечивать параметры теплоносителя при эксплуатации, нормативный уровень тепловых потерь через нее, безопасную для человека температуру наружных поверхностей.

Требуется обеспечить оптимальное соотношение между стоимостью теплоизоляционной конструкции и стоимостью тепловых потерь через изоляцию в течение расчетного срока эксплуатации.

Также теплоизоляционные конструкции должны отвечать требованиям эксплуатационной надежности и долговечности, т.е. выдерживать без снижения теплозащитных свойств и разрушения эксплуатационные температурные,

механические, химические и другие воздействия в течение расчетного срока эксплуатации.

При выборе теплоизоляционных материалов и изделий входящих в состав теплоизоляционных конструкций для поверхностей с положительными температурами теплоносителя (20 °С и выше), следует учитывать следующие факторы: месторасположение изолируемого объекта; температуру изолируемой поверхности; температуру окружающей среды; требования пожарной безопасности; агрессивность окружающей среды или веществ, содержащихся в изолируемых объектах; коррозионное воздействие; материал поверхности изолируемого объекта; допустимые нагрузки на изолируемую поверхность; наличие вибрации и ударных воздействий; требуемую долговечность теплоизоляционной конструкции; санитарно-гигиенические требования; температуру применения теплоизоляционного материала; теплопроводность теплоизоляционного материала; температурные деформации изолируемых поверхностей; конфигурация и размеры изолируемой поверхности; условия монтажа (стесненность, высотность, сезонность и др.); условия демонтажа и утилизации.

Действующие нормативные документы в области проектирования тепловой изоляции оборудования и трубопроводов не содержат достаточных рекомендаций, позволяющих учитывать все перечисленные выше факторы. В частности, нет рекомендаций позволяющих оценить соответствие долговечности теплоизоляционного материала предъявляемым требованиям к долговечности теплоизоляционной конструкции. Также не учитывается изменение теплоизоляционных свойств материала в процессе эксплуатации теплоизоляционной конструкции.

В ГОСТ 31912-2011 являющимся адаптированной версией к европейскому стандарту EN ISO 23993:2008 вводятся поправки при определении расчетной теплопроводности. Поправки к теплопроводности установлены для различных условий и действительны в диапазоне температур от -200 °С до 1000 °С [43]. Учитывается влияние влаги, влияние сжимаемости, влияние конвекции, влияние

крепежных элементов. Влияние старения теплоизоляционного материала хоть и упоминается, но не учитывается в расчёте, нет рекомендаций или ссылок на другие стандарты позволяющие оценить старение теплоизоляционных материалов.

В ГОСТ Р 57418-2020 описан метод позволяющий прогнозировать изменение теплопроводности в процессе эксплуатации минераловатных теплоизоляционных материалов от знакопеременных температур в ограждающих конструкциях зданий и сооружений, не подверженных внешнему механическому воздействию [44]. Определяется устойчивость характеристик теплопроводности материала после воздействия до 100 циклов замораживания-оттаивания. Однако в условиях эксплуатации трубопроводов транспортирующих высокотемпературные теплоносители отсутствует циклическое замораживание-оттаивание изоляционного материала, т.к. температура в слое материала остается положительной.

Также следует отметить, отсутствие однозначных требований к максимальной рабочей температуре при эксплуатации теплоизоляционных материалов.

Так, например в СНиП 41-01-2003 [41] для цилиндров и полуцилиндров минераловатных указывается температура применения до 400 °С, производители указывают предельную температуру применения до 950 °С.

Под предельной температурой применения понимается температура, при которой материал выполняет свое функциональное назначение [45]. Есть некоторые попытки официально регламентировать требования к определению максимальной рабочей температуры. В ГОСТ EN 14707-2011 (идентичен европейскому стандарту EN 14707:2005) установлены требования к методике определения максимальной рабочей температуры цилиндров заводского изготовления, применяемых для инженерного оборудования зданий и промышленных установок. Сущность метода заключается в измерение толщины образца после одностороннего термического воздействия в течение 72 часов под нагрузкой 500 Па при максимальной рабочей температуре [46]. Если значение изменения толщины превышает значение, заданное в стандарте или технических

условиях на изделие, то испытания следует повторять при меньших температурах. Однако в действующих на территории Российской Федерации технических условиях на изделия не прописаны допустимые отклонения в толщине после выдержки материала в указанных выше условиях.

### **2.3 Существующие методы расчета эффективной теплопроводности волокнистых теплоизоляционных материалов**

Расчетные зависимости, используемые для определения теплозащитных свойств теплоизоляционных материалов, базируются на законе Фурье.

С учётом особенности структуры теплоизоляционных материалов, представляющих собой разнообразные газонаполненные системы, коэффициент теплопроводности определяется как обобщенная характеристика проводимости теплоты в материале, включающем в своем объеме твердую фазу и газоструктурные элементы.

Передача теплоты в теплоизоляционных материалах включает в себя перенос теплоты кондуктивной теплопроводностью, излучением и конвекцией, и осуществляется посредством [47]:

- теплопроводности твердого скелета, образующего пористую структуру материала;
- теплопроводности газа, находящегося в порах и капиллярах;
- излучения между стенками пор и капилляров;
- конвективного переноса теплоты за счет конвективных токов газа в пористой структуре теплоизоляции.

Суммарный вклад всех трёх составляющих определяет эффективную теплопроводность материала.

$$\lambda_{эф} = \lambda_q + \lambda_p + \lambda_k \quad (2.1)$$

На основании проведенного анализа работ, посвященных исследованиям тепломассообменных процессов в волокнистых теплоизоляционных материалах,

эксплуатируемых в условиях повышенных температур, ниже приведены зависимости для определения составляющих эффективной теплопроводности волокнистых теплоизоляционных материалов.

В работах [48-54], содержащих исследования процессов теплообмена в теплоизоляционных материалах, для определения кондуктивной составляющей теплопроводности используется модель О. Кришера [50].

Расчетные формулы этой модели для определения кондуктивной теплопроводности материалов имеют вид:

в сухом состоянии:

$$\lambda_q = \frac{1}{(1 - a) / \lambda_1 + a / \lambda_2}; \quad (2.2)$$

$$\lambda_1 = (1 - m)\lambda_b + m\lambda_r; \quad (2.3)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{(1 - m) / \lambda_b + m / \lambda_r}, \quad (2.4)$$

где  $a$  – экспериментально определяемый коэффициент, характеризующий структуру материала;  $m$  – пористость материала в долях единицы;  $\lambda_b$  – теплопроводность волокна;  $\lambda_r$  – теплопроводность газа, заполняющего пористую структуру материала.

для увлажненного слоя:

$$\lambda_q^{вл} = \frac{1}{(1 - a) / \lambda_1^{вл} + a / \lambda_2^{вл}}; \quad (2.5)$$

$$\lambda_1^{вл} = (1 - m)\lambda_b + W \cdot \lambda_{ж} + (m - W)\lambda_r; \quad (2.6)$$

$$\lambda_2^{вл} = \frac{1}{(1 - m) / \lambda_b + W / \lambda_{ж} + (m - W) / \lambda_r}, \quad (2.7)$$

где  $\lambda_{ж}$  – теплопроводность воды,  $W$  – эффективная влажность материала по объему, остальные обозначения (2.5-2.7) те же, что и в (2.2-2.4).



При замещении воздуха в поровом пространстве теплоизоляционных материалов водой, имеющей большую теплопроводность, соответственно происходит увеличение теплопроводности материала.

Отмечается [27, 48], что формулы (2.5-2.7) справедливы в диапазоне температур от +4 до +25 °С.

При температурах выше указанных, теплообмен во влажном материале усложняется из-за перемещения влаги по направлению теплового потока – явления термовлагопроводности, открытого и исследованного А.В. Лыковым [51-54].

Причины возникновения термовлагопроводности обуславливаются различными физическими процессами, протекающими в капиллярно-пористых увлажненных телах в зависимости от характера капиллярно-пористой структуры, влагосодержания, градиента и уровня температуры. При этом направление перемещения влаги может совпадать по направлению с плотностью теплового потока, или может быть противоположно направлению плотности теплового потока.

При неполном насыщении капиллярно-пористого тела влагой градиент температуры обуславливает возникновение градиента поверхностного натяжения воды в менисках, в местах сужения пор и капилляров. При этом происходит термокапиллярное движение воды в сторону большего поверхностного натяжения, т.е. в сторону понижающихся температур, совпадающее с направлением плотности теплового потока [55].

В полностью увлажненных капиллярно-пористых телах, из-за разности в удельном теплосодержании жидкости в тонком пограничном слое у поверхности пор и капилляров и в объеме, возможно перемещение жидкости против теплового потока, в сторону более высоких температур – явление термоосмоса. Однако интенсивность переноса жидкости против теплового потока, за счёт термоосмоса при одинаковом градиенте температуры на два порядка ниже, чем интенсивность термокапиллярного потока жидкости по направлению теплового потока [55].

Градиент парциального давления насыщенного пара, находящегося в порах и капиллярах влажного материала, обуславливаемый наличием градиента

температуры, приводит к диффузионному переносу влаги в виде пара от мест с более высокой температурой к местам с температурой более низкой. Процесс диффузионного переноса пара сопровождается конденсацией водяного пара в зоне с более низкими температурами и увеличением влагосодержания в ней, т.е. перенос влаги происходит по направлению теплового потока.

При нагревании влажного тела испарение жидкости в пористой структуре тела, является причиной увеличения массы паровоздушной смеси в неизменном объеме капиллярно-пористого тела, что в совокупности с расширением паровоздушной смеси при нагревании обуславливает возникновение избыточного давления. Впервые этот факт экспериментально был обнаружен Г.А. Максимовым. В работе утверждается [27], что избыточное давление может возникать и при отсутствии кипения в пористой структуре материала при нагревании его ниже 100 °С, при этом сохраняется избыточное давление только до тех пор, пока осуществляется подъем температуры влажного тела, т. е. до стабилизации температурного режима. При эксплуатации теплоизоляционных конструкций, в условиях тепловых воздействий с окружающей средой, избыточное давление и обуславливаемая им фильтрационная термовлагопроводность, в них обычно не возникает и основной причиной перемещения влаги по направлению, совпадающему с направлением теплового потока, является диффузия парообразной влаги [48].

Отмечается [48], что явление термовлагопроводности в теплоизоляционных материалах с высокой пористостью, преимущественно, обусловлено диффузионным переносом парообразной влаги, за счёт градиента парциального давления насыщенного пара во влажном материале. С увеличением плотности существенно возрастает удельная поверхность и уменьшается диффузионная массопроводность, при этом основной вклад в термовлагопроводность будет вносить термокапиллярный эффект.

Эффект увеличения теплопроводности влажного материала при его нагревании, предлагается учитывать введением дополнительного коэффициента диффузионной составляющей теплопроводности [48]:

$$\lambda_t = \left( 1 - \frac{1}{1 + W - W^2} \right) \cdot \lambda_m \cdot \alpha \cdot r \cdot b \cdot \exp(b \cdot t_{cp}), \quad (2.8)$$

где  $W$  – относительное влагосодержание изоляции по объему;  $\lambda_m$  – коэффициент паропроницаемости изоляции, кг/(м·ч·Па);  $r$  – теплота фазового перехода влаги ккал/кг;  $t_{cp}$  – средняя температура материала, °С;  $\alpha = 2666$  Па;  $b = 0,046$  1/°С.

Сопровождающие диффузионный перенос парообразной влаги фазовые превращения значительно увеличивают интенсивность потока теплоты, но только в начальный период нагрева влажной изоляции (3-10 часов) [27] до установления стационарного температурного режима. Отмечено [48], что стабилизация поля влагосодержания наступает значительно позднее, примерно через 18-20 суток.

В работе [47] представлен сравнительный анализ результатов расчёта радиационной составляющей эффективной теплопроводности в волокнистых теплоизоляционных материалах от температуры, выполненных по соотношениям, предложенными различными исследователями.

Наилучшим приближением к реальному процессу лучистого теплообмена в волокнистых теплоизоляционных материалах являются результаты, полученные по следующим соотношениям:

$$\lambda_p = \frac{\sigma T_m^3 \pi d_v}{K_{осл} (1 - m)}, \quad (2.9)$$

где  $\sigma$  – константа Больцмана  $4,965 \cdot 10^{-8}$  ккал/м<sup>2</sup>·ч·град;  $T_m$  – средняя температура изоляции, К;  $m$  – пористость;  $d_v$  – диаметр волокна, м;  $K_{осл}$  – коэффициент ослабления, константа, определяемая для различных видов волокон по эмпирическим формулам:

базальтовое волокно:

$$K_{\text{осл}} = 70md_{\text{в}}T_m + 5 \times 10^3(1 - m)^2 / T_m; \quad (2.10)$$

минеральное волокно:

$$K_{\text{осл}} = 20md_{\text{в}}T_m + 7 \cdot 10^3(1 - m)^2 T_m; \quad (2.11)$$

стекловолокно:

$$K_{\text{осл}} = 11,2 \cdot 10^6 md_{\text{в}}T_m + 800(1 - m)^2 / T_m. \quad (2.12)$$

Конвективная составляющая эффективной теплопроводности играет значительную роль при отрицательных температурах изолируемой поверхности, малой плотности изоляции и больших диаметрах волокна [27]. При положительных температурах изолируемой поверхности влияние конвективной составляющей эффективной теплопроводности несущественно.

В работе [47] приводятся полуэмпирические критериальные зависимости, определяющие конвективную теплопроводность волокнистой изоляции от фильтрационного числа Релея  $Ra^{\otimes}$ :

для плоского горизонтального слоя при  $40 < Ra^{\otimes} \leq 100$ :

$$E_k = (Ra^{\otimes})^{0,05}; \quad (2.13)$$

для плоского вертикального слоя при  $0 < Ra^{\otimes} \leq 100$ :

$$E_k = (Ra^{\otimes})^{0,035}; \quad (2.14)$$

в цилиндрических конструкциях при  $0 < Ra^{\otimes} \leq 100$ :

$$E_k = 1 + 5,9 \cdot 10^{-3} [\eta(1 - \eta)]^{3/4} \exp(-4,29\eta) \cdot (Ra^{\otimes})^2 \quad (2.15)$$

В уравнениях 2.13-2.15:

$$Ra^{\otimes} = \frac{g\beta LK\rho^2 c_p \Delta T}{\mu(\lambda_q + \lambda_p) \cdot 2,78 \cdot 10^{-4}}; \quad (2.16)$$

$$\eta = \frac{r_1}{r_2}; \quad (2.17)$$

где:  $2,78 \cdot 10^{-4}$  – коэффициент перевода размерности теплопроводности из ккал/м·час·°С в ккал/м·с·°С;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, кг/м·с;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\beta$  – коэффициент температурного расширения, 1/°С;  $L$  – толщина слоя изоляции, м, для цилиндрического слоя  $L = r_2 - r_1$ ;  $r_1$  – радиус поверхности изолируемого трубопровода;  $r_2$  – то же, поверхности изоляции;  $K$  – коэффициент проницаемости изоляции, м<sup>2</sup>.

Автором [47] была получена зависимость для определения коэффициента проницаемости волокнистой изоляции:

$$K = \frac{m^3}{4 \left[ \frac{4(1 - m - n / 100)}{d_b} \right]^2}, \quad (2.18)$$

где  $n$  – содержание неволокнистых включений, %;  $d_b$  – диаметр волокна, м;  $m$  – пористость волокнистой изоляции.

В данном параграфе представлены существующие методы расчета эффективной теплопроводности волокнистых теплоизоляционных материалов с учетом температурных режимов эксплуатации, геометрических характеристик конструкций и их ориентации в пространстве, герметичности покрывного слоя, а также увлажнения тепловой изоляции.

Однако в представленных расчетных зависимостях не учитывается, изменение теплопроводности в зависимости от ориентации волокон и воздушных прослоек материала относительно направления теплового потока.

Также следует отметить, что в представленных расчетных зависимостях не учитывается, как будут изменяться теплофизические и технологические свойства волокнистой изоляции при деградации структуры материала под действием высоких температур в течении длительного времени.

## **2.4 Исследования теплообмена в волокнистых теплоизоляционных материалах. Зависимость теплопроводности волокнистых теплоизоляционных материалов от плотности, температуры, диаметра волокон**

Эффективная теплопроводность зависит от многих факторов. Помимо создаваемого температурного градиента, влияние оказывают и давление газа, заполняющего поры, степень черноты поверхности пор и капилляров, диаметр волокон, возникающие фазовые превращения при перемещении парообразной влаги.

В связи со сложностью учёта всех возможных влияющих факторов при теоретическом расчёте эффективной теплопроводности, необходимостью использования в расчётах констант, определяемых эмпирически, интерес представляют результаты экспериментальных исследований.

В работе [56] представлена методика расчёта кондукционных, радиационной и конвекционной составляющих теплопроводности волокнистых теплоизоляционных строительных материалов. По результатам экспериментальных измерений теплопроводности образцов теплоизоляционных материалов определялись значения эмпирических констант, используемых автором работы [56] в предложенной методике определения эффективной теплопроводности. В качестве примера приведены результаты расчета зависимости теплопроводности минераловатных изделий и её отдельных составляющих (кондукционных и радиационных) от плотности при температуре +25 °С. Расчёты выполнены для минераловатных изделий из габбро-диабазы с диаметром волокон, характерным для этого материала и равным 5 мкм. В том числе приводятся результаты расчетов зависимости теплопроводности, её кондукционной и радиационной составляющих от плотности материала и температуры в диапазоне от -20 °С до +25 °С, для минераловатных и стекловолоконных изделий. Конвекционная составляющая теплопроводности не учитывается. Утверждается, что «для волокнистых и ячеистых эффективных теплоизоляционных строительных материалов малой плотности доля

конвекционной составляющей в общем тепловом потоке через эти материалы равняется  $(2-3) \cdot 10^{-3} \%$ , а для волокнистых и ячеистых эффективных теплоизоляционных строительных материалов большой плотности эта доля равняется  $(2-5) \cdot 10^{-3} \%$ ».

Автором [56] отмечено, что «зависимость теплопроводности минераловатных изделий от плотности имеет минимум». «Минимальное значение теплопроводности достигается при той плотности материала, при которой радиационная составляющая теплопроводности равна её кондукционной, составляющей». «Радиационная составляющая теплопроводности эффективных теплоизоляционных волокнистых и ячеистых строительных материалов убывает с увеличением плотности материала или изделия, её значение существенно только при малых плотностях материала или изделия» [56].

Результаты расчета зависимости составляющих эффективной теплопроводности волокнистых теплоизоляционных материалов от плотности при температуре  $+25 \text{ }^\circ\text{C}$ , полученные автором [56] с помощью теоретически выведенных зависимостей, подтверждаются экспериментально полученными им значениями теплопроводности минераловатных изделий различных производителей.

Представляют интерес экспериментальные исследования по определению теплопроводности волокнистых теплоизоляционных материалов при повышенных температурах изолируемой поверхности [47].

Для определения теплопроводности волокнистых теплоизоляционных материалов при высоких температурах, автором [47] были проведены испытания образцов тепловой изоляции из базальтового волокна со средним диаметром волокна  $3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  с объемной массой  $40-300 \text{ кг/м}^3$  и изоляции из минерального волокна со средним диаметром волокна  $3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$  с объемной массой  $70-300 \text{ кг/м}^3$  в диапазоне температур на наружной поверхности изоляции  $200-600^\circ\text{C}$ , на внутренней  $30^\circ\text{C}$ .

На основании результатов проведенных испытаний, а также учитывая результаты расчетов, численного моделирования эффективной теплопроводности волокнистых материалов делаются следующие выводы [47]:

«зависимость эффективной теплопроводности от плотности изоляции при повышенных температурах для исследованных волокнистых материалов описывается плавной кривой, имеющей минимум»;

«с повышением диаметра волокна эффективная теплопроводность волокнистой изоляции увеличивается»;

«интенсивность переноса тепла излучением повышается с температурой и при температурах 150 °С и выше имеет тот же порядок, что интенсивность кондуктивного переноса; с увеличением диаметра волокон радиационная теплопроводность увеличивается, а с увеличением плотности изоляции – снижается. При прочих равных условиях радиационная теплопроводность стекловолокна почти в 2 раза ниже, чем у минерального и базальтового»;

«при положительных температурах изолируемой поверхности влияние конвективной составляющей несущественно».

## **2.5 Эффективность систем транспортирования тепло и энергоносителей.**

### **Оценка эффективности применяемых теплоизоляционных материалов**

Эффективность систем транспортирования тепло и энергоносителей с точки зрения уменьшения тепловых потерь зависит от эффективности используемых теплоизоляционных материалов.

Эффективность тепловой изоляции оценивается с помощью утвержденных нормативных значений тепловых потерь [26]. Величина фактических потерь тепловой энергии через теплоизоляционные конструкции не должна превышать нормативных значений. Сравнение нормативных тепловых потерь с фактическими позволяет определять «слабые» участки со сверхнормативными потерями и проводить работы по замене тепловой изоляции на таких участках для повышения эффективности систем транспортирования тепло и энергоносителей.



Порядок определения нормативных значений тепловых потерь через теплоизоляционные конструкции трубопроводов утвержден приказом Министерства Энергетики Российской Федерации от 30.12.2008 № 325.

Для участков трубопроводов водяных тепловых сетей, определение нормативных часовых тепловых потерь, Гкал/ч, согласно [26] осуществляется по формуле:

$$Q_{\text{из.н.год}} = \sum (k_{\text{и}} q_{\text{из.н}} L \beta) \times 10^{-6}, \quad (2.19)$$

где  $k_{\text{и}}$  – поправочный коэффициент для определения нормативных часовых тепловых потерь, полученный по результатам испытаний на тепловые потери;  $q_{\text{из.н}}$  – удельные часовые тепловые потери трубопроводами каждого диаметра, определённые перерасчётом табличных значений норм удельных часовых тепловых потерь на среднегодовые (среднесезонные) условия эксплуатации, ккал/чм;  $L$  – длина участка трубопроводов тепловой сети, м;  $\beta$  – коэффициент местных тепловых потерь, учитывающий тепловые потери запорной и другой арматурой, компенсаторами и опорами.

Значения поправочного коэффициента  $k_{\text{и}}$  определяются по формуле:

$$K_{\text{и}} = Q_{\text{ф}} / Q_{\text{н}}, \quad (2.20)$$

где  $Q_{\text{ф}}$  и  $Q_{\text{н}}$  – тепловые потери, определённые в результате испытаний на тепловые потери, пересчитанные на среднегодовые условия эксплуатации каждого испытанного участка трубопроводов тепловой сети, и потери, определённые по нормам для тех же участков, Гкал/ч.

Введение поправочного коэффициента  $k_{\text{и}}$  позволяет учесть фактическое состояние изоляции и трубопроводов тепловых сетей. Однако определяется

данный коэффициент только в результате проведения испытаний на тепловые потери участков тепловых сетей и применяется только к участкам аналогичным испытанным (по типу прокладки, виду изоляционных конструкций и условиям эксплуатации).

Кроме того, важно отметить, что использование поправочного коэффициента  $k_{и}$ , при определении нормативных часовых тепловых потерь тепловых сетей, означает подгон нормативных значений под фактические, что нивелирует всю суть сравнения нормативных тепловых потерь с фактическими значениями для выявления участков со сверхнормативными тепловыми потерями, требующих замены тепловой изоляции.

При использовании в качестве теплоносителя пара, определение нормативных значений часовых тепловых потерь паропроводов для всех участков магистралей производится пересчетом табличных значений удельных норм на средние параметры теплоносителя на каждом участке магистрали с учетом конструктивных особенностей (тип прокладки, год проектирования, наружный диаметр трубопроводов).

Много работ посвящено проблеме увеличения тепловых потерь через теплоизоляционные конструкции трубопроводов водяных тепловых сетей [57-69].

На стабильность теплозащитных свойств теплоизоляционных конструкций водяных тепловых сетей оказывают влияние различные физико-механические воздействия окружающей среды, приводящие к изменению структуры материала, что в совокупности с увлажнением материала, приводит к резкому увеличению тепловых потерь.

Периодическое увлажнение, замораживание и оттаивание тепловой изоляции при смене сезонов ускоряет процесс деградации материала, что увеличивает коэффициент теплопроводности материала и уменьшает срок эффективной эксплуатации.

По результатам исследований, проведенных институтом «Теплопроект», представлены [27] зависимости теплозащитных свойств теплоизоляционных конструкций тепловых сетей от срока эксплуатации.

Из приведенных зависимостей следует, что в первые пять лет эксплуатации, в зависимости от вида теплоизоляционного материала, а также способа прокладки, тепловые потери через теплоизоляционные конструкции водяных тепловых сетей могут увеличиться от 13 до 50 %.

Результаты исследований по определению фактических тепловых потерь на примере тепловых сетей г. Казани [70] так же показывают увеличение фактических тепловых потерь над нормативными при использовании изоляции из минеральной ваты.

Применяемые в тепловых сетях предварительно изолированные в заводских условиях трубы с пенополиуретановой изоляцией позволяют уменьшить вероятность увлажнения изоляции в процессе эксплуатации, что в совокупности с низким коэффициентом теплопроводности пенополиуретана, обеспечивает величину тепловых потерь в пределах нормативных значений, при соблюдении требований монтажа и эксплуатации [71]. Однако следует учитывать ограничения по температуре эксплуатации пенополиуретановой изоляции. Допустимая температура эксплуатации пенополиуретана составляет 130 °С [41], по другим источникам 100 °С [27]. При превышении указанной температуры происходит деструкция теплоизоляционного материала, приводящая к резкому увеличению коэффициента теплопроводности [72, 73].

## **2.6 Оценка фактических тепловых потерь через тепловую изоляцию трубопроводов**

Для оценки фактических тепловых потерь в водяных тепловых сетях в настоящее время можно выделить три основных направления.

Первое – фактические эксплуатационные тепловые потери устанавливаются экспериментально путем проведения тепловых испытаний сети в соответствии с РД 34.09.255-97. Отмечается [70], что данный метод используется в основном на магистральных теплопроводах, в связи со сложностью выполнения необходимых требований проведения испытаний. А именно, испытания проводятся на циркуляционном кольце с отсоединением ответвлений и присоединенных

абонентов от испытываемого кольца, требуется обеспечить температурный перепад не менее  $8^{\circ}\text{C}$ , а также поддержание режима постоянного расхода в ходе испытаний.

Второе – определение разницы между отпущенной тепловой энергией от источника и показаниями приборов учета у потребителя. Однако данный метод не позволяет определять потери на конкретном участке сети, а дает представление только о величине тепловых потерь по всей протяженности сети.

Как третье направление можно выделить методы математического моделирования тепловых потерь в процессе эксплуатации. В работах [48, 64] проведено численное моделирование величины тепловых потерь трубопроводов в условиях увлажнения тепловой изоляции. Однако на увеличение тепловых потерь в процессе эксплуатации оказывает влияние не только увлажнение теплоизоляционного слоя, а также изменение структуры материала, его физическая деградация [74]. В процессе эксплуатации слой волокнистой тепловой изоляции уплотняется, толщина слоя уменьшается, происходит провисание теплоизоляционной конструкции, или частичное разрушение, что приводит к увеличению тепловых потерь.

В случае с промышленной тепловой изоляцией величина фактических тепловых потерь по сравнению с нормативными может достигать от 20 до 60 % в зависимости от условий эксплуатации и особенностей температурных режимов [27].

Выделяют следующие возможные причины увеличения фактических тепловых потерь через теплоизоляционные конструкции промышленного оборудования и трубопроводов на основе волокнистых материалов: высокие температуры изолируемых поверхностей, механические нагрузки, вследствие вибраций или ветрового напора, провисание изоляции, увлажнение, нарушение покрывного слоя.

Определение фактических тепловых потерь паропроводов по разнице показателей приборов учета на источнике и у потребителя не позволяет определять участки с наибольшими потерями.

В работе [75] предложена методика определения годовых тепловых потерь паропроводов по результатам инфракрасной термографической диагностики. Однако автором отмечается, что результаты, полученные на реальном промышленном объекте с использованием указанной методики, ниже потерь, определенных на основе теплового баланса производства и потребления энергоносителя на 30-40%.

Проверку состояния изоляции трубопроводов в условиях эксплуатации предлагается осуществлять с помощью устройства, в основе работы которого лежит метод дополнительной стенки.

Автором был получен патент [76] на полезную модель устройства для измерения плотности теплового потока (Приложение 2).

Устройства аналогичного назначения, например ИТП-МГ 4.03 «Поток» или «Теплограф» используемые для измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции зданий и сооружений [77] не позволяют осуществлять контроль тепловой изоляции паропроводов, находящихся в эксплуатации, из-за возникающих затруднений при установке датчиков на поверхности изолированного трубопровода.

Недостатком существующих приборов является сложность крепления датчиков теплового потока типа «дополнительной стенки» к поверхности материала цилиндрической стенки, тепловые потери через которую необходимо определить. Для точности измерений датчик теплового потока типа «дополнительной стенки» должен плотно прижиматься к поверхности. При этом если в качестве теплоизоляционного материала для изоляции трубопроводов используется волокнистая тепловая изоляция, то при креплении датчика теплового потока к поверхности изоляционного материала необходимо учитывать плотность материала, чтобы избежать механических повреждений или изменения плотности материала в месте крепления датчика. Величина теплового потока через волокнистые изоляционные материалы зависит от плотности материала, поэтому для точности определения величины теплового потока, необходимо регулировать силу прижатия датчика к поверхности, обеспечивая плотность контакта датчика и

исследуемой поверхности, но при этом, не допуская уплотнения материала в месте крепления датчика.

Полезная модель устройства относится к средствам для измерений количества теплоты и может быть использована для измерения плотности теплового потока на трубопроводах, изолированных волокнистыми теплоизоляционными материалами различной плотности.

Сущность полезной модели поясняется на рисунке 2.1. Устройство работает следующим образом. На трубопровод 11 (рис. 2.1 а), изолированный теплоизоляционным материалом 12, тепловые потери через который необходимо определить, надевается манжета 2. Манжета закрепляется с помощью металлического кольца для крепления 10 (рис. 2.1 б). На внутренней части манжеты расположены датчики теплового потока 1 (рис. 2.1 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.

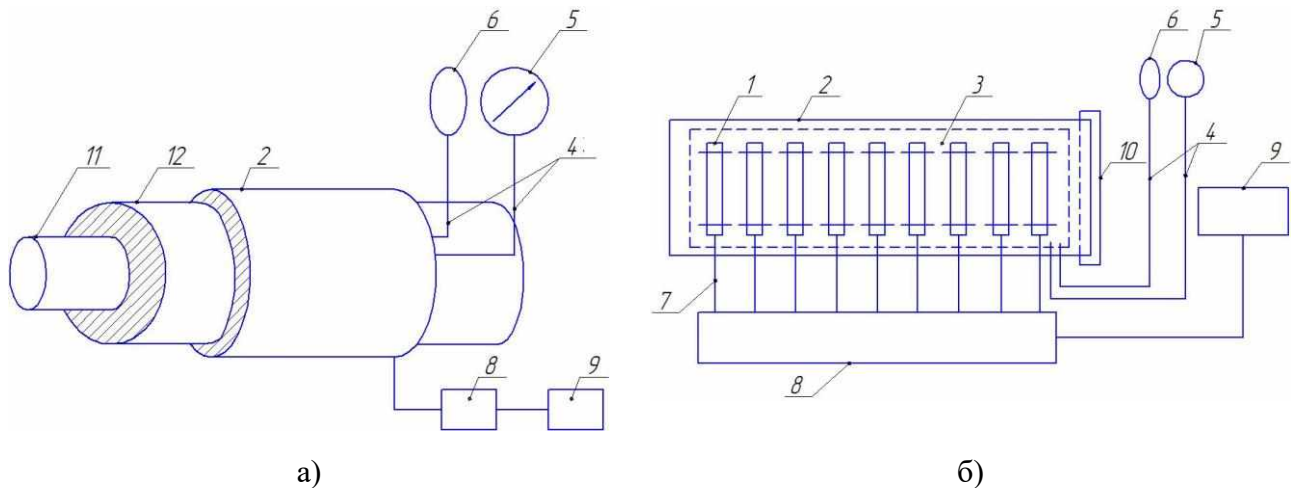


Рис. 2.1 а) – расположение устройства для измерения плотности теплового потока на обследуемом трубопроводе в тепловой изоляции; б) – общий вид устройства для измерения плотности теплового потока; 1 – датчики теплового потока; 2 – компрессионная манжета; 3 – пневмокамера; 4 – пневмотрубки; 5 – манометр; 6 – нагнетатель воздуха; 7 – электрические провода; 8 – аналого-цифровой преобразователь; 9 – персональный компьютер (ПК); 10 – кольцо для крепления; 11 – трубопроводов; 12 – теплоизоляционный материал.

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 и персональный компьютер 9. АЦП считывает сигнал с датчиков и преобразовывает его из аналогового в цифровой. Сигнал обрабатывается, значения величины плотности теплового потока выводятся на экран ПК 9.

Использование предложенного устройства позволит проводить измерение фактической плотности теплового потока через тепловую изоляцию паропроводов на действующих объектах.

Важно отметить, что нормативных документов, определяющих методику оценки фактических тепловых потерь паропроводов до сих пор нет, что затрудняет оценку эффективности применяемых теплоизоляционных материалов.

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 / прокладка 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. Температура транспортируемого пара постоянна в течении года, что обеспечивает достижение тепловой стационарности теплоизоляционных конструкций.

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 [26] по разнице температур:



$$\Delta t = \tau_{\text{п}}^{\text{ср}} - t_0^{\text{нз}}, \quad (2.21)$$

где  $\tau_{\text{п}}^{\text{ср}}$  – средняя температура пара на каждом участке (проектная), °С;  $t_0^{\text{нз}}$  – температура воздуха при проведении измерений, °С.

Для расчёта средней температуры пара на каждом участке рассчитывается конечная температура пара на участке.

Конечная температура  $\tau_{2i}$  на каждом участке паропровода определяется по формуле:

$$\tau_{2i} = t_0^{\text{нз}} + (\tau_{1i} - t_0^{\text{нз}}) \cdot e^{\frac{-L_i \cdot \beta}{R_i \cdot G_i \cdot c_i}}, \quad (2.22)$$

где  $t_0^{\text{нз}}$  – температура воздуха при проведении измерений, °С;  $\tau_{1i}$  – температура пара в начале участка, °С;  $\beta$  – коэффициент местных тепловых потерь;  $R_i$  – суммарное термическое сопротивление  $i$ -го участка, (м·°С)/Вт, при проектных значениях коэффициента теплопроводности изоляционного материала;  $G_i$  – расход пара на  $i$ -м участке, кг/с;  $c_i$  – удельная изобарная теплоемкость пара при средних значениях давления и температуры, Дж/(кг·°С).

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

$$K = q_{\text{ф}} / q_{\text{н}}^{\text{нз}}. \quad (2.23)$$

9) Определяют часовые среднегодовые тепловые потери сети пароснабжения, кДж/ч (ккал/ч·м):

$$Q_{\text{ф}}^{\text{ср.г}} = K \cdot 3,6 \cdot \sum q_{\text{ни}}^{\text{ср.г}} \cdot \beta_i \cdot L_i, \quad (2.24)$$

где  $q_{\text{ни}}^{\text{ср.г}}$  – нормативные значения удельной линейной плотности теплового потока на участке, при среднегодовой температуре наружного воздуха [26], Вт/м;

$\beta_i$  – коэффициент местных тепловых потерь, учитывающий тепловые потери запорной и другой арматурой, компенсаторами и опорами, определяется по [26];  $L_i$  – длина участка, м.

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 на участке. 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.

## **2.7 Выводы по главе**

1. Для изоляции объектов, транспортирующих высокотемпературные тепло и энергоносители наиболее распространенными остаются волокнистые теплоизоляционные материалы из минеральных волокон. Так же следует отметить, относительно новые для Российского рынка – теплоизоляционные материалы из кремнеземного аэрогеля, применяемые в том числе и для изоляции высокотемпературных объектов.

2. Действующие нормативные документы не позволяют однозначно определять предельную температуру применения изоляционных материалов, оценивать старение материала, т.е. деградацию структуры материала под действием высоких температур или прогнозировать долговечность изоляционных материалов при эксплуатации в условиях высоких температур.

3. Проведен анализ современных представлений о механизме процессов совместного тепло и массообмена в капиллярно-пористых телах. Представлены существующие методы расчета эффективной теплопроводности волокнистых теплоизоляционных материалов с учетом температурных режимов эксплуатации, геометрических характеристик конструкций и их ориентации в пространстве, герметичности покрывного слоя, а также увлажнения тепловой изоляции. Однако в представленных расчетных зависимостях не учитывается, изменение теплопроводности в зависимости от ориентации волокон и воздушных прослоек материала относительно направления теплового потока.

Также следует отметить, что в представленных расчетных зависимостях не учитывается, как будут изменяться теплофизические и технологические свойства волокнистой изоляции при деградации структуры материала под действием высоких температур в течении длительного времени.

4. Эффективность применяемых для уменьшения тепловых потерь изоляционных материалов оценивается способностью обеспечить величину тепловых потерь в пределах нормативных значений на протяжении всего срока эксплуатации.

5. Из анализа литературных источников можно сделать вывод, что фактические тепловые потери, вследствие влияния эксплуатационных факторов, могут значительно превышать нормативные значения. Для разных теплоизоляционных материалов отмечается снижение теплозащитных свойств в зависимости от срока эксплуатации.

6. Отсутствует методика определения фактических тепловых потерь паропроводов, что затрудняет оценку эффективности применяемых теплоизоляционных материалов.

7. Предложена модель устройства для измерения плотности теплового потока через тепловую изоляцию трубопроводов.

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

### **3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЛОКНИСТЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДЕГРАДАЦИИ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА**

Теплозащитные свойства волокнистых теплоизоляционных материалов зависят не только от физико-механических свойств материала (плотность, теплопроводность волокон, диаметр волокон) и температурных режимов их эксплуатации, но также от геометрических параметров конструкции и ориентации в пространстве [27]. Однако и структура расположения волокон также влияет на теплозащитные свойства. В работе [47] представлены результаты экспериментальных исследований фильтрационной проницаемости различных видов волокнистой изоляции в зависимости от их плотности при направлениях фильтрующего потока воздуха вдоль и поперек ковра. Автором [47] установлена анизотропия проницаемости волокнистой изоляции, величина коэффициента проницаемости для всех испытанных материалов при фильтрации поперек ковра в 1,2-1,5 раза ниже, чем при фильтрации вдоль ковра. В работе [45] отмечается, что при направлении теплового потока вдоль волокон теплопроводность может существенно увеличиться, чем при перпендикулярной направленности. Однако в научной литературе в настоящее время нет данных, насколько существенно может быть влияние ориентации волокон и воздушных прослоек (пор, капилляров) материала относительно направления теплового потока на увеличение коэффициента теплопроводности.

Также, как показано во второй главе, ни в действующих нормативных документах, регламентирующих деятельность при выборе теплоизоляционных материалов и проектировании теплоизоляционных конструкций, ни в существующих расчетных методах определения эффективной теплопроводности не учитывается физическая деградация структуры материала при эксплуатации в условиях высоких температур. Отсутствует оценка изменения коэффициента теплопроводности волокнистой тепловой изоляции при деградации структуры материала под действием высоких температур.

### **3.1 Экспериментальная установка для исследования теплопроводности волокнистых теплоизоляционных материалов методом стационарного теплового режима на образцах цилиндрической формы**

Экспериментальная оценка теплозащитных свойств волокнистой изоляции производилась на образцах цилиндрической формы, и при стационарном температурном режиме, т.к. большинство теплоизоляционных конструкций эксплуатируется именно в таких условиях (около 80 %) [27].

Для исследования теплопроводности в волокнистых теплоизоляционных материалах была выбрана методика стационарной теплопроводности во фрагменте конструкции цилиндрической формы.

Определение коэффициента теплопроводности для теплоизоляционных изделий цилиндрической формы проводилось в соответствии с ГОСТ 32025-2012 «Тепловая изоляция. Метод определения характеристик теплопереноса в цилиндрах заводского изготовления при стационарном тепловом режиме» [78].

Экспериментальная установка [79] (рис. 3.1, 3.2) состоит из трубчатого электронагревателя патронного типа ТЭНП (стальная трубка с вмонтированным внутри нагревателем) (1), поверх которого располагается теплоизоляционный материал в виде полого цилиндра с продольным разрезом (2). Длина ТЭНП составляет 500 мм, наружный диаметр 32 мм. Максимальная мощность нагревателя составляла 2500 Вт, рабочая температура – до 400°С. Контроль температуры нагрева ТЭНП осуществлялся с помощью измерителя-регулятора (9), а регулирование данного параметра внутри трубы – с помощью лабораторного автотрансформатора (3). Для измерения температуры нагревателя использовалась вмонтированная внутрь ТЭНП хромель-алюмелевая термопара ТХА (4). Сигнал с датчиков считывался и преобразовывался с помощью аналого-цифрового преобразователя АЦП (5). В персональном компьютере (8) осуществлялась обработка полученного сигнала с помощью разработанного программного обеспечения в программном комплексе LabVIEW.

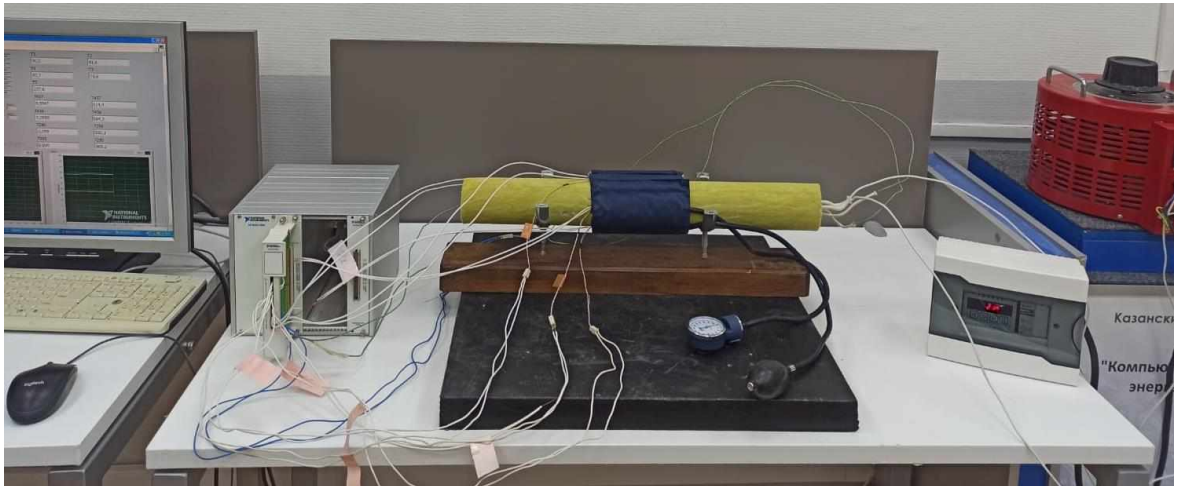


Рис. 3.1 Внешний вид экспериментальной установки для определения теплозащитных свойств теплоизоляционных материалов

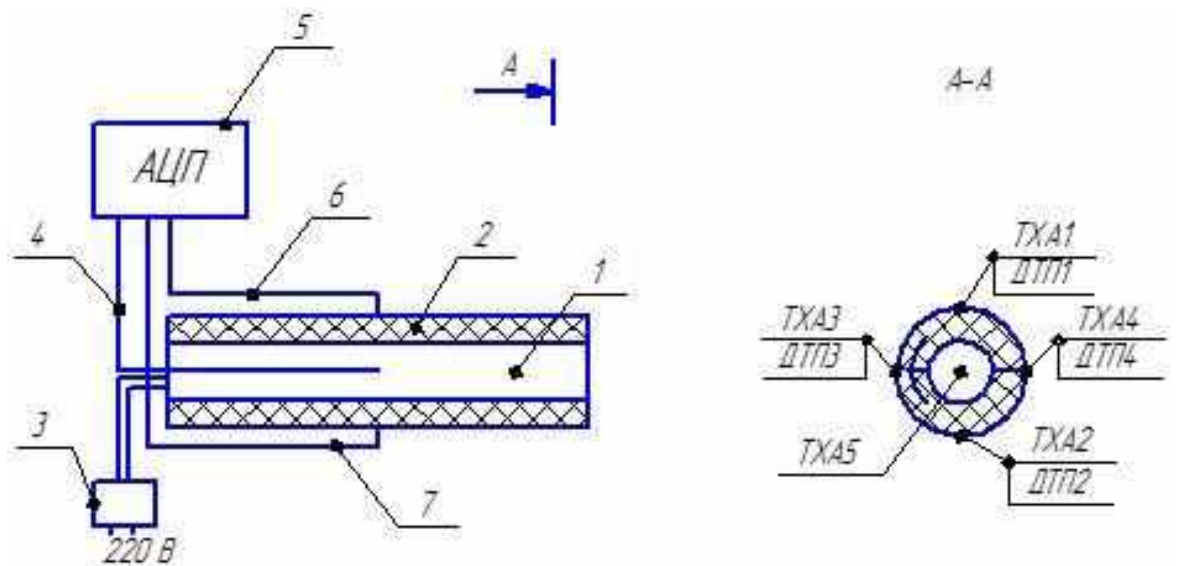


Рис. 3.2 Схема установки для определения коэффициента теплопроводности теплоизоляционного материала. 1 – нагреватель; 2 – теплоизоляционный материал; 3 – лабораторный автотрансформатор; 4 – термопара нагревателя; 5 – аналого-цифровой преобразователь; 6 – хромель-алюмелевые термопары (ТХА1, ТХА2, ТХА3, ТХА4) 7 – высокотемпературные датчики теплового потока (ДТП1, ДТП2, ДТП3, ДТП4).

Для измерения температуры поверхности изоляционного материала использовались также хромель-алюмелевые термопары ТХА (6), с рабочим диапазоном измеряемых температур от  $-200$  до  $+1100^{\circ}\text{C}$ .

Для измерения плотности теплового потока на поверхность исследуемого теплоизоляционного материала устанавливались высокотемпературные датчики теплового потока (ДТП) (7) со следующими характеристиками: размер –

52 x 10 мм; толщина – 2 мм; диапазон измерения 10 – 1000 Вт/м<sup>2</sup>; постоянная времени – не более 10 с; коэффициент эффективной теплопроводности – 0,5 Вт/(м·К); толщина – 2 мм. Тепловое сопротивление датчика теплового потока толщиной 2 мм составило 0,0166 (м<sup>2</sup>·К) / Вт. Это сопротивление вносило погрешность измерения не более 3%.

Измерение плотности теплового потока и температур на поверхности материала осуществляется с помощью устройства, описанного в параграфе 2.6. Датчики теплового потока и термопары установлены в средней части трубы по периметру исследуемого образца на 3, 6, 9 и 12 часов (рисунок 3.2). Чувствительным элементом датчика теплового потока является гипербатарея медь-константановых пар, выполненных по гальванической технологии. На квадратном сантиметре датчика умещается до 1500 термопар. Их суммарный сигнал пропорционален разности температур на толщине датчика и, следовательно, тепловому потоку через него. Плотность теплового потока через датчик определяется умножением сигнала на тарировочный коэффициент. Коэффициент индивидуален для каждого датчика, указывается в паспорте датчика и имеет порядок от 5 до 40 Вт/(м<sup>2</sup>·мВ).

Измерения и обработка экспериментальных данных проводились на оборудовании и программном обеспечении фирмы National Instruments. Для регистрации сигналов датчиков теплового потока использовалась модульная система согласования сигналов SCXI 1102. Система SCXI включает в себя промышленное шасси с установленными в него согласующими модулями. Аналоговые входные модули служат интерфейсом для датчиков и сигналов и повышают качество и достоверность измерений посредством высокопроизводительных, малошумящих цепей согласования: усиления, изоляции, мультиплексирования, фильтрации, питания датчиков, устройств выборки и хранения и коммутации сигналов.

При известной плотности теплового потока определялся коэффициент теплопроводности исследуемого материала из формулы закона Фурье:



$$\lambda = \frac{q}{(t_1 - t_2)} \cdot \delta, \quad (3.1)$$

где  $q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\delta$  – толщина исследуемого образца теплоизоляции, м;  $(t_1 - t_2)$  – разность температур лицевых граней испытываемого образца, измеряемая с помощью термопар, °С.

Для образцов цилиндрической формы коэффициент теплопроводности исследуемого материала определяется по следующей формуле:

$$\lambda = \frac{q_L \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi \cdot (t_1 - t_2)}, \quad (3.2)$$

где  $q_L$  – линейная плотность теплового потока, Вт/м;  $d_1$  – наружный диаметр трубы, м;  $d_2$  – наружный диаметр цилиндрического образца, м;  $t_1$  – температура на поверхности теплоизолируемой трубы, измеряемая с помощью термопар, °С;  $t_2$  – температура на наружной поверхности теплоизоляции, измеряемая с помощью термопар, °С.

Пересчёт тепловых потерь с 1 м<sup>2</sup> поверхности изоляции на 1 погонный метр длины цилиндрического слоя этой изоляции выполняется по формуле:

$$q_L = q_F \cdot \pi \cdot d_2, \quad (3.3)$$

где  $q_F$  – поверхностная плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>.

С помощью, установленных на испытуемом образце датчиков теплового потока и термопар (схема установки датчиков см. рисунок 3.2) фиксировались значения плотности теплового потока через цилиндрическую стенку исследуемого образца, а также температура на наружной и внутренней поверхности теплоизоляционного материала (рисунок 3.3).

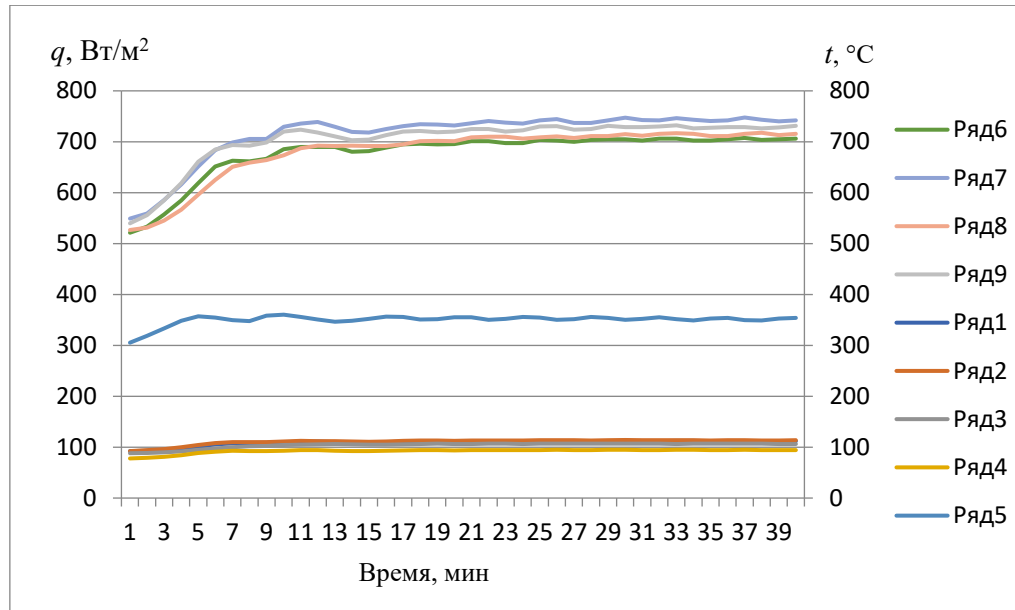


Рис. 3.3 Регистрация значений плотности теплового потока через цилиндрическую стенку исследуемого образца и температур на наружной и внутренней поверхности стенки теплоизоляционного материала. Ряд 1 – показания термопары ТХА1, °С, Ряд 2 – показания термопары ТХА2, °С, Ряд 3 – показания термопары ТХА3, °С, Ряд 4 – показания термопары ТХА4, °С, Ряд 5 – показания термопары ТХА5, °С, Ряд 6 – показания датчика теплового потока ДТП1, Вт/м<sup>2</sup>, Ряд 7 – показания датчика теплового потока ДТП2, Вт/м<sup>2</sup>, Ряд 8 – показания датчика теплового потока ДТП3, Вт/м<sup>2</sup>, Ряд 9 – показания датчика теплового потока ДТП4, Вт/м<sup>2</sup>.

Для каждого образца была проведена серия экспериментов, во время которых температура на наружной поверхности металлической трубы поддерживалась 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 °С.

В качестве образцов использовались теплоизоляционные цилиндры из базальтового волокна плотностью 60, 80, 100, 120, 150 кг/м<sup>3</sup> различных производителей. Длина исследуемых образцов – 500 мм, внутренний диаметр исследуемых образцов – 32 мм.

Коэффициент теплопроводности исследуемого образца определялся после установления в зоне измерения стационарного теплового режима, характеризуемого постоянством по времени всех регистрируемых значений (плотность теплового потока, температуры наружной и внутренней поверхности стенки теплоизоляционного материала) по формуле 3.2.

Коэффициент теплопроводности теплоизоляционных цилиндров определялся для участков в соответствии со схемой установки датчиков теплового потока и температуры на 3, 6, 9 и 12 часов, показанной на рисунке 3.2.

### **3.2 Экспериментальная установка для исследования теплопроводности волокнистых теплоизоляционных материалов методом стационарного теплового режима на плоских образцах**

Для исследования тепловых процессов в волокнистых теплоизоляционных материалах методом стационарного теплового режима на плоских образцах была собрана экспериментальная установка, которая состоит из керамического плоского нагревателя (1) размещенного между двумя металлическими плитами (2), регулируемой по высоте верхней прижимной металлической плиты (3) для фиксации исследуемого образца (4), хромель-алюмелевых термопар (6), датчиков теплового потока (5), металлического защитного кожуха (7), лабораторного автотрансформатора, термостат, АЦП, ПК (рисунок 3.4)

Описание экспериментальной установки приведено ниже, внешний вид – рисунок 3.5.

На металлическом каркасе жестко закреплена плита размером 400×400 мм, на которой располагается плоский керамический нагреватель размером 400×400 мм (1). Каркас, представляет собой две квадратные металлические рамки размещенные одна в другой и жестко закрепленные между собой. Размер внешней рамки каркаса 450×450 мм, размер внутренней рамки 400×400 мм. Мощность нагревателя 4000 Вт, рабочая температура 450°С. Сверху нагреватель закрывается металлической плитой (3), на поверхности которой размещается исследуемый образец (4). По периметру конструкции устанавливается металлический кожух (короб) размером 450×450 мм, высотой 300 мм. Сверху кожуха крепится верхний металлический каркас, аналогичный описанному выше. К верхнему каркасу с помощью болтовых соединений, позволяющих регулировать высоту, крепится верхняя прижимная металлическая плита (3) (400×400 мм), фиксирующая исследуемый образец.

Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 7076-99. Для измерений подготавливались образцы размером 400×400 мм, равным размеру рабочей поверхности плиты нагревателя.

Перед проведением испытаний образцы высушивались до постоянной массы. Образец считают высушенным до постоянной массы, если потеря его массы после очередного высушивания в течение 0,5 ч не превышает 0,1% [80].

Схема проведения измерений представлена на рисунке 3.4. Исследуемый образец волокнистого теплоизоляционного материала размещается на плите нагревателя (2). Боковые грани испытываемого образца обкладываются слоем теплоизоляционного материала, термическое сопротивление которого не менее термического сопротивления образца.

Температура поверхности нагревателя регулируется с помощью термопары (6), расположенной на плите нагревателя в центральной части её лицевой грани. На исследуемом образце размещаются хромель-алюмелевые термопары ТХА (6), с рабочим диапазоном измеряемых температур от -200 до +1100°С, а также датчики теплового потока типа вспомогательной стенки (5). Испытуемый образец, а также размещенные на нем датчики температуры и теплового потока фиксируются верхней прижимной металлической плитой, регулируемой по высоте в зависимости от толщины образца. С помощью лабораторного автотрансформатора обеспечивалась необходимая температура нагрева. Контроль температуры нагрева осуществлялся с помощью термостата.

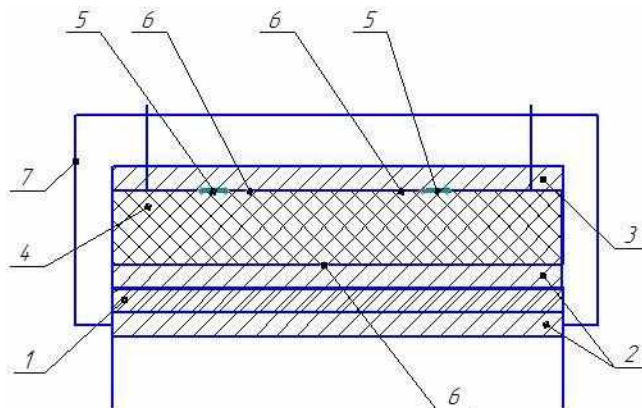


Рис. 3.4 Схема проведения измерений. 1 – нагреватель; 2 – металлическая плита; 3 – прижимная плита; 4 – исследуемый образец; 5 – датчики теплового потока; 6 – термопары; 7 – металлический защитный кожух



Рис. 3.5 Внешний вид экспериментальной установки для определения теплопроводности теплоизоляционных материалов

Сигнал с датчиков считывался и преобразовывался с помощью аналого-цифрового преобразователя АЦП. В персональном компьютере осуществлялась обработка полученного сигнала с помощью разработанного программного обеспечения в программном комплексе LabVIEW.

Коэффициент теплопроводности исследуемого материала определялся после установления в зоне измерения стационарного теплового режима по зависимости (3.1).

### 3.3 Оценка погрешности результатов измерений

#### 3.3.1 Оценка погрешности прямых измерений температуры

Оценка погрешности прямых измерений температуры производилась в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011.

Оценку измеряемой величины  $\tilde{t}$ , за которую принимают среднее арифметическое значение исправленных результатов измерений, вычисляют по формуле:

$$\tilde{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i, \quad (3.4)$$

где  $t_i$  –  $i$ -й результат измерений;  $n$  – число измерений.

Результаты измерений температуры:  $t_1=97,61$  °C;  $t_2=98,20$  °C;  $t_3=98,20$  °C;  $t_4=97,61$  °C;  $t_5=97,02$  °C; количество измерений  $n=5$ .

Среднее арифметическое значение результатов измерений температуры составило  $97,73$  °C.

Среднеквадратическое отклонение результата измерения, вычисляют по формуле:

$$S(\tilde{t}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \tilde{t})^2}{n(n-1)}}, \quad (3.5)$$

с учетом  $\tilde{t}$  соответственно получим  $S(\tilde{t}) = 0,2208$  °C.

Доверительные границы случайной погрешности результата измерения (без учета знака):

$$\varepsilon = t \cdot S(\tilde{t}), \quad (3.6)$$

где  $t$  - коэффициент Стьюдента, составляющий 2,776 для  $P=0,95$ .

Соответственно  $\varepsilon = 0,6129$  °C.

Доверительные границы неисключенной систематической погрешности результата измерений:

$$\Theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \Theta_i^2}, \quad (3.7)$$

где  $k = 1,1$  при  $P = 0,95$ ,  $\Theta_i$  - граница  $i$  - ой неисключенной систематической погрешности (без учета знака).

Для учета неисключенной систематической погрешности оценивалась погрешность АЦП и термопары ТХА по следующей формуле:

$$\Theta_c = k \sqrt{\Theta_{ТХА}^2 + \Theta_{АЦП}^2}, \quad (3.8)$$

где  $\Theta_{\text{ТХА}}$  и  $\Theta_{\text{АЦП}}$ - границы неисключенной систематической погрешности термопары ТХА и АЦП соответственно и составляют:

$\Theta_{\text{ТХА}} = \pm 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ , предельно допускаемое отклонение для термопар типа К (ТХА) по ГОСТ Р 8.585-2001

$\Theta_{\text{АЦП}} \pm 0,00688 \text{ мВ}$  – погрешность квантования АЦП (определенная для 16-разрядной АЦП при диапазоне измерений от 0 до 450  $^\circ\text{C}$ ), что в соответствии с градуировочными таблицами для термопар типа К составляет 0,18  $^\circ\text{C}$ .

Исходя из этого, имеем:  $\Theta_c = 1,6614 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Границы погрешности оценки измеряемой величины (без учета знака) вычисляют по формуле:

$$\Delta = K \cdot S_\Sigma, \quad (3.9)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от соотношения случайной и неисключенной систематической погрешностей,

$S_\Sigma$  - оценка суммарного среднего квадратичного отклонения результата измерения и определяются по формулам:

$$K = \frac{\varepsilon + \Theta}{S(\tilde{t}) + S_\Theta}, \quad (3.10)$$

$$S_\Sigma = \sqrt{S(\tilde{t})^2 + S_\Theta^2}, \quad (3.11)$$

где  $S_\Theta$  –среднее квадратическое отклонение НСП, которое оценивают в зависимости от способа вычисления НСП по формуле:

$$S_\Theta = \frac{\Theta_c}{\sqrt{3}} \quad (3.12)$$

Доверительный интервал составил  $\Delta_c = \pm 1,90^\circ\text{C}$ , при доверительной вероятности  $P=0,95$  (при средних значениях результатов измерений температуры 97,73 $^\circ\text{C}$ ).

### 3.3.2 Оценка погрешности прямых измерений плотности тепловых потоков

Оценка погрешности прямых измерений плотности тепловых потоков производилась в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011.

Оценку измеряемой величины  $\tilde{q}$ , за которую принимают среднее арифметическое значение исправленных результатов измерений, вычисляют по формуле:

$$\tilde{q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i, \quad (3.13)$$

где  $q_i$  –  $i$ -й результат измерений;  $n$  – число измерений.

Результаты измерений плотности теплового потока:  $q_1=530,62$  Вт/м;  $q_2=535,61$  Вт/м;  $q_3=539,97$  Вт/м;  $q_4=536,85$  Вт/м;  $q_5=533,74$  Вт/м; количество измерений  $n=5$ .

Среднее арифметическое значение результатов измерений плотности теплового потока составило 535,36 Вт/м.

Среднеквадратическое отклонение результата измерения, вычисляют по формуле:

$$S(\tilde{q}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \tilde{q})^2}{n(n-1)}}, \quad (3.14)$$

с учетом  $\tilde{q}$  соответственно получим  $S(\tilde{q}) = 1,5583$  Вт/м

Доверительные границы случайной погрешности результата измерения (без учета знака):

$$\varepsilon = t \cdot S(\tilde{q}), \quad (3.15)$$

где  $t$  - коэффициент Стьюдента, составляющий 2,776 для  $P=0,95$ .

Соответственно  $\varepsilon = 4,3258$  Вт/м.



Доверительные границы неисключенной систематической погрешности результата измерений определяются по формуле 3.7

Для учета неисключенной систематической погрешности оценивалась погрешность АЦП и датчиков теплового потока по следующей формуле:

$$\Theta_c = k \sqrt{\Theta_{ДТП}^2 + \Theta_{АЦП}^2}, \quad (3.16)$$

где  $\Theta_{ДТП}$  и  $\Theta_{АЦП}$  - границы неисключенной систематической погрешности ДТП и АЦП соответственно и составляют:

$$\Theta_{ДТП} = \pm 16 \text{ Вт/м},$$

$\Theta_{АЦП} \pm 0,0031 \text{ мВ}$  – погрешность АЦП, что в соответствии с тарифовочным коэффициентом для ДТП составляет 0,0828 Вт/м.

Исходя из этого, имеем:  $\Theta_c = 17,6002 \text{ Вт/м}$ .

Границы погрешности оценки измеряемой величины (без учета знака) вычисляют по формуле:

$$\Delta = K \cdot S_{\Sigma}, \quad (3.17)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от соотношения случайной и неисключенной систематической погрешностей,

$S_{\Sigma}$  – оценка суммарного среднего квадратичного отклонения результата измерения и определяются по формулам:

$$K = \frac{\varepsilon + \Theta}{S(\tilde{q}) + S_{\Theta}}, \quad (3.18)$$

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S(\tilde{q})^2 + S_{\Theta}^2}, \quad (3.19)$$

где  $S_{\Theta}$  – среднее квадратическое отклонение НСП, которое оценивают в зависимости от способа вычисления НСП по формуле 3.12.

Доверительный интервал составил  $\Delta_c = \pm 19,23$  Вт/м, при доверительной вероятности  $P=0,95$  (при средних значениях результатов измерений плотности теплового потока 535,36 Вт/м).

### 3.3.3 Расчет погрешности косвенных измерений коэффициента теплопроводности

Абсолютная погрешность косвенных измерений:

$$\Delta \tilde{\lambda} = \tilde{\lambda} \sqrt{\left(\frac{\Delta \tilde{t}}{\tilde{t}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \tilde{q}}{\tilde{q}}\right)^2}, \quad (3.20)$$

что составит 0,0018Вт/(м·°С)

Относительная погрешность  $0,0018/0,0442 = 0,0407 = 4,7\%$ .

## 3.4 Результаты экспериментального исследования теплопроводности волокнистых теплоизоляционных материалов. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры, а также от плотности материала

Была произведена серия экспериментов для трех материалов разной плотности от одного производителя [81]. Коэффициент теплопроводности готовых заводских теплоизоляционных цилиндров плотностями 80, 100 и 120 кг/м<sup>3</sup> определялся в соответствии с требованиями ГОСТ 32025-2012.

Для каждой плотности измерения проводились на трёх образцах. Длина образцов составляла 500 мм, толщина изоляции 17 мм, внутренний диаметр цилиндра 32 мм. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры для материалов с плотностями 80, 100 и 120 кг/м<sup>3</sup> представлены на рисунках 3.6 - 3.8.

Усредненные значения коэффициента теплопроводности для материалов плотностью 80, 100 и 120 кг/м<sup>3</sup> представлены в таблице 3.1.

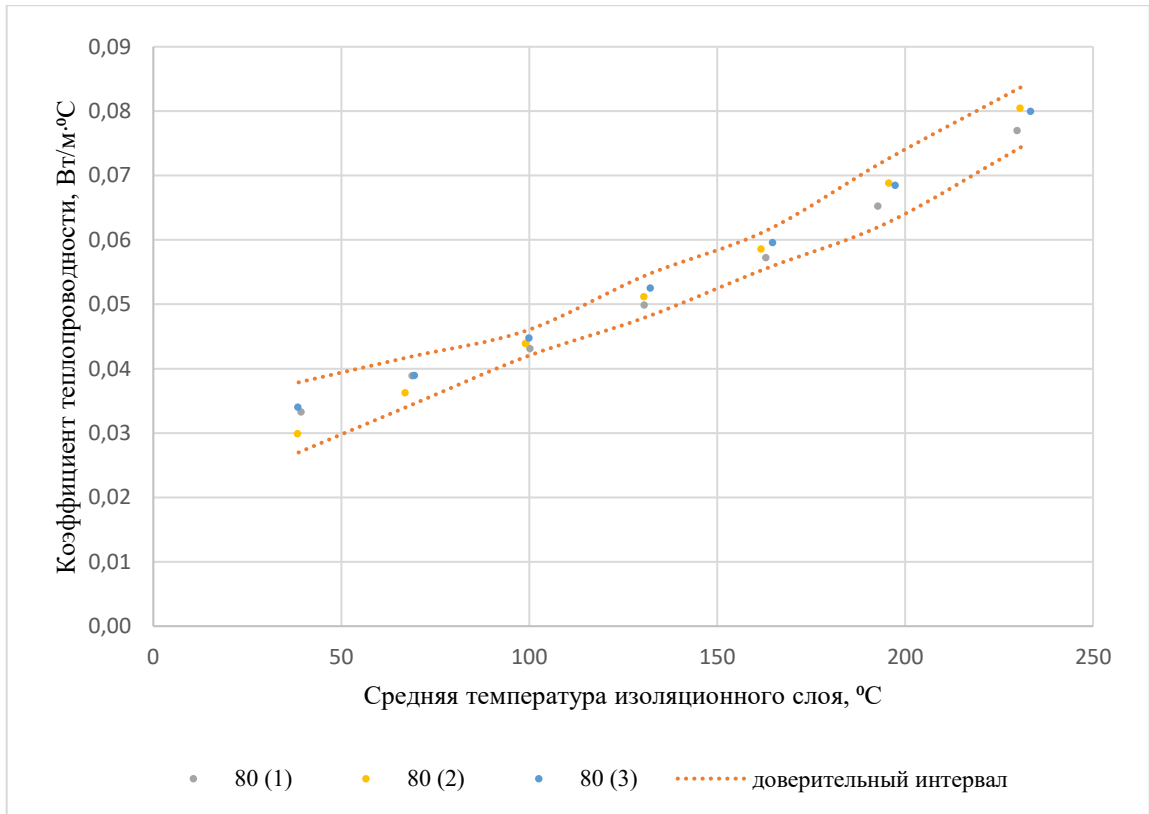


Рис. 3.6 Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры для трех образцов плотностью 80 кг/м³

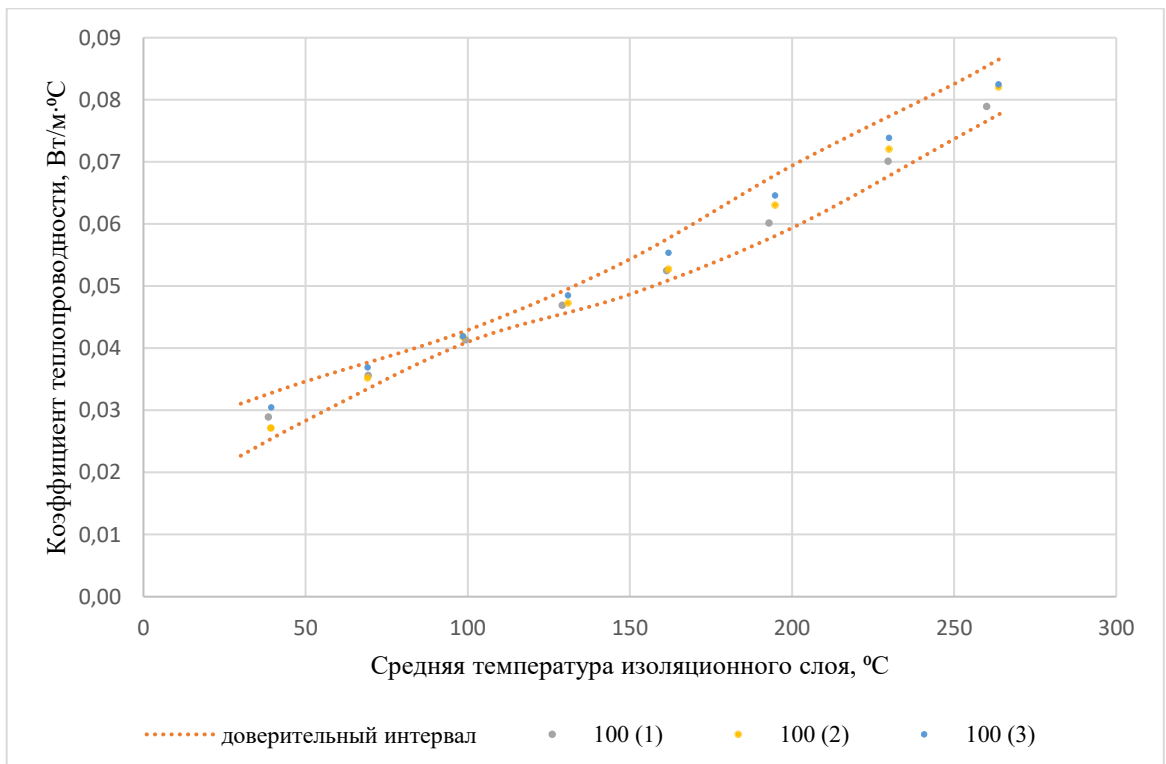


Рис. 3.7 Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры для трех образцов плотностью 100 кг/м³

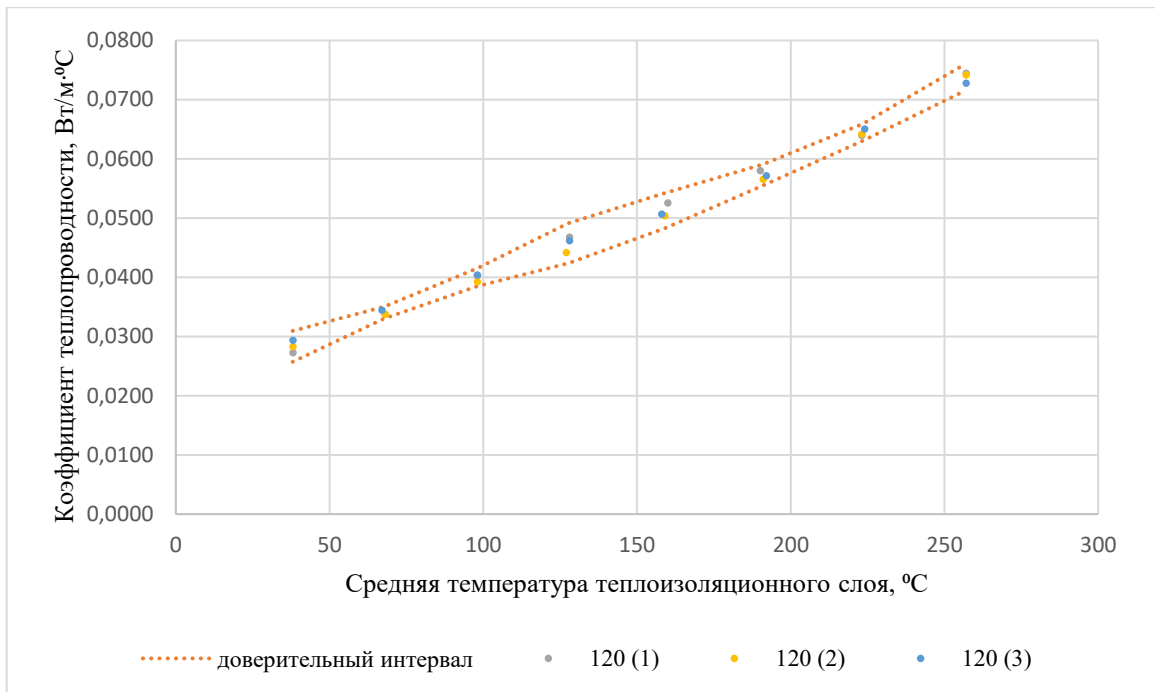


Рис. 3.8 Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры для трех образцов плотностью 120 кг/м<sup>3</sup>

Таблица 3.1 Значения коэффициента теплопроводности для материалов плотностью 80, 100 и 120 кг/м<sup>3</sup> для температур изолируемой поверхности в диапазоне от 50 до 400 °C

Температура изолируемой трубы, °C	Средняя температура изоляционного слоя °C для образцов плотностью 80 кг/м <sup>3</sup>	Средняя температура изоляционного слоя °C для образцов плотностью 100 кг/м <sup>3</sup>	Средняя температура изоляционного слоя °C для образцов плотностью 120 кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности Вт / (м ·°C). для образцов плотностью 80 кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности Вт / (м ·°C). для образцов плотностью 100 кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности Вт / (м ·°C). для образцов плотностью 120 кг/м <sup>3</sup>
50	39	39	38	0,0324	0,0289	0,0283
100	68	69	68	0,0381	0,0359	0,0340
150	100	99	98	0,0440	0,0417	0,0400
200	131	129	128	0,0512	0,0476	0,0457
250	163	161	159	0,0585	0,0535	0,0512
300	195	193	191	0,0676	0,0626	0,0573
350	231	229	223	0,0792	0,0720	0,0644
400	262	261	257	-	0,0812	0,0738

В таблице 3.1 видно, что для образцов плотностью  $80 \text{ кг/м}^3$  коэффициент теплопроводности не был определен. Для этих образцов при температуре  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  на поверхности изолируемой трубы величина плотности теплового потока, фиксируемая датчиками теплового потока, превышала допустимый диапазон измерений  $10 - 1000 \text{ Вт/м}^2$ .

Полученные результаты показывают зависимость коэффициента теплопроводности от температуры, а также от плотности материала. (см. рисунок 3.9). Из рисунка 3.9 также видно, что с увеличением температуры увеличивается влияние плотности на коэффициент теплопроводности. При температуре изолируемой поверхности  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  коэффициент теплопроводности материала плотностью  $80 \text{ кг/м}^3$  выше на 23% чем у материала плотностью  $120 \text{ кг/м}^3$ .

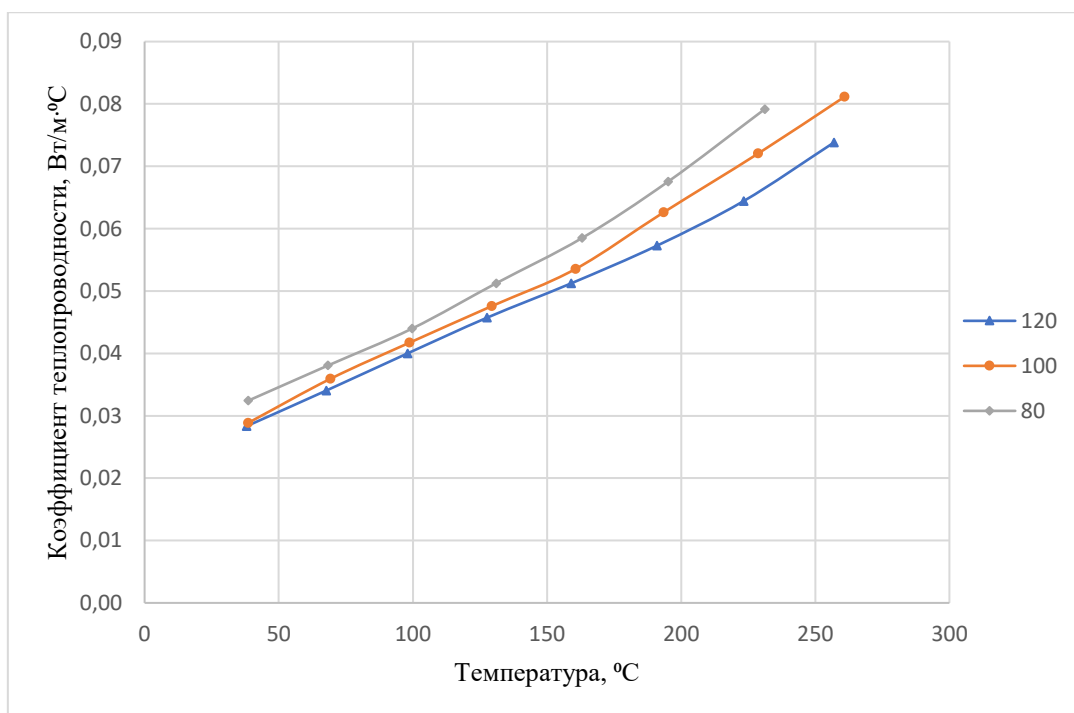


Рис. 3.9 Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры для материалов плотностями  $80, 100$  и  $120 \text{ кг/м}^3$

Также была проведена серия экспериментов для образцов теплоизоляционных цилиндров с плотностями  $60$  и  $150 \text{ кг/м}^3$ .

Для каждого образца была проведена серия экспериментов, в ходе которых температура на внешней поверхности трубчатого патронного нагревателя

поддерживалась на уровне 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 °С. По результатам проведенных экспериментов в таблице 3.2 приведены усредненные для трёх образцов значения коэффициента теплопроводности теплоизоляционных цилиндров из базальтового волокна различной плотности при температурах изолируемой поверхности от 50 до 400 °С.

На рисунке 3.10 показана зависимость коэффициента теплопроводности волокнистых теплоизоляционных материалов от температуры и от плотности материала. Для материалов плотностью 60 и 150 кг/м<sup>3</sup> значения коэффициента теплопроводности при средней температуре слоя 200 и 250 °С получены экстраполированием значений из таблицы 3.2.

Таблица 3.2 Значения коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м·°С), для теплоизоляционных цилиндров из базальтового волокна в зависимости от плотности материала и температуры изолируемой поверхности

Температура изолируемой поверхности, °С	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·°С), при плотности:				
	60, кг/м <sup>3</sup>	80, кг/м <sup>3</sup>	100, кг/м <sup>3</sup>	120, кг/м <sup>3</sup>	150, кг/м <sup>3</sup>
50	0,0445	0,0324	0,0289	0,0283	0,0545
100	0,0514	0,0381	0,0359	0,0340	0,0608
150	0,0577	0,0440	0,0417	0,0400	0,0680
200	0,0639	0,0512	0,0476	0,0457	0,0761
250	0,0719	0,0585	0,0535	0,0512	0,0848
300		0,0676	0,0626	0,0573	
350		0,0792	0,0720	0,0644	
400			0,0812	0,0738	

Представленные результаты показывают, что на теплопроводность волокнистых теплоизоляционных материалов влияет рабочая температура материала и его плотность.

С уменьшением плотности материала увеличивается количество воздушных включений, размер и количество сквозных пор, что приводит к усилению конвективного теплообмена за счет конвективных газовых потоков в пористой

структуре теплоизоляции. С другой стороны, с увеличением плотности материала увеличивается масса теплопроводных минеральных компонентов (теплопроводность твердого каркаса, образующего пористую структуру материала), что приводит к увеличению теплопроводности.

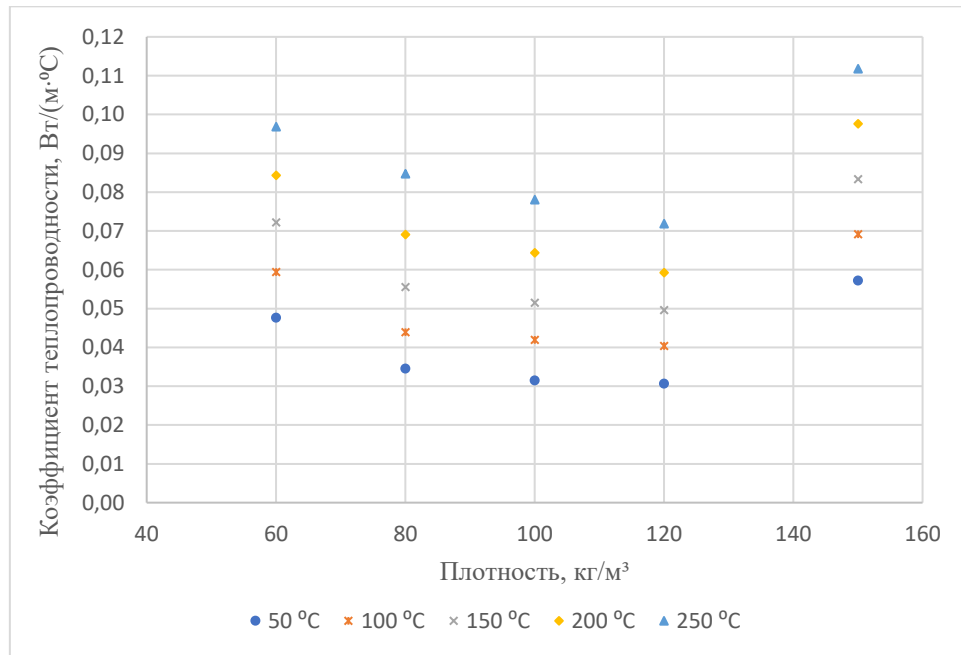


Рис. 3.10 Коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов из базальтового волокна в зависимости от плотности и средней температуры теплоизоляционного слоя (50, 100, 150, 200, 250 °C)

Полученные выводы согласуются с опубликованными результатами исследований теплообмена в волокнистых теплоизоляционных материалах [27, 47, 82].

### 3.5 Влияние деградации структуры материала на изменение теплозащитных свойств

При изготовлении изделий из каменной ваты для скрепления волокон между собой широко используются различные органические связующие. В качестве связующих применяют фенол-формальдегидные, фенол-мочевинно-формальдегидные смолы, карбамидные смолы, поливинилацетатные дисперсии и др. [45]. К связующему добавляют различные добавки для усиления адгезии с

поверхностью минеральных волокон, а также технологические масла для повышения гидрофобности и уменьшения пылеобразования [83].

В работе [83] отмечается, что одной из основных проблем синтетических связующих является ухудшение их механических свойств в долгосрочной перспективе.

Все фасонные изделия (цилиндры, полуцилиндры, сегменты) получают только с использованием связующего. Формование осуществляется способами навивки, горячего прессования или вырезания из блока.

Габбро-базальтовые породы, являющиеся сырьем для изготовления волокон, имеет высокую рабочую температуру применения до 1000 °С. Однако, под действием высоких температур происходит разрушение полимерного связующего (термическая деструкция), связующее полностью разлагается до температур 600-650 °С [84].

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.

Степень разложения связующего или степень конверсии  $\alpha$ , определялась как отношение текущего изменения массы к изменению массы, произошедшему при полном выгорании 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 3.11 представлен общий вид испытательного оборудования с образцами.

На рисунках 3.12-3.14 представлен внешний вид образцов после выдержки в печи при различных температурах для достижения разной степени выгорания связующего.





Рис. 3.11 Общий вид испытательного оборудования с образцами



Рис. 3.12 Теплоизоляционные цилиндры Экоролл плотность  $80 \text{ кг/м}^3$ , слева – новый образец; справа – после 12 часов при температуре  $650 \text{ °C}$  (связующее полностью выгорело)

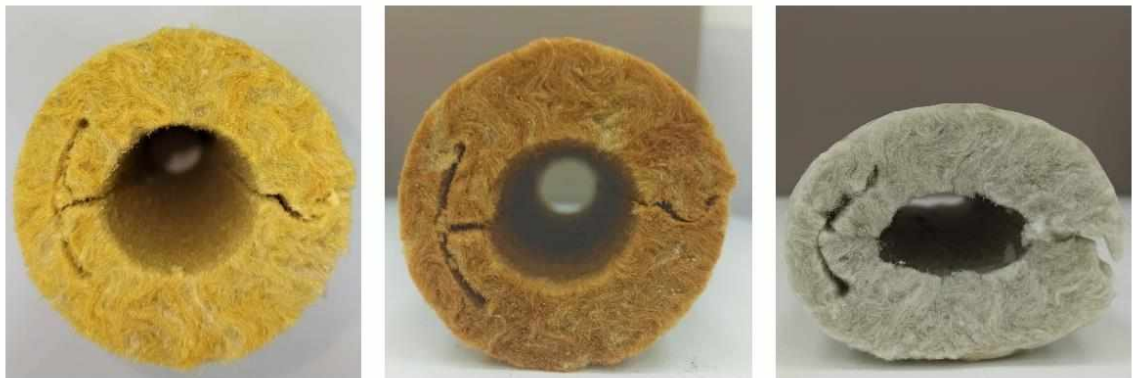


Рис. 3.13 Теплоизоляционные цилиндры BOS плотность  $100 \text{ кг/м}^3$  (слева направо) новый образец; после 12 часов при температуре  $250 \text{ °C}$  (степень конверсии 0,2); после 12 часов при температуре  $650 \text{ °C}$  (связующее полностью выгорело)



Рис. 3.14 Теплоизоляционные цилиндры BOS плотность  $100 \text{ кг/м}^3$  вид сверху, (слева направо) новый образец; после 12 часов при температуре  $250 \text{ °C}$  (степень конверсии 0,2); после 12 часов при температуре  $650 \text{ °C}$  (связующее полностью выгорело)

Используемое для скрепления волокон связующее повышает жесткость, прочность изделия, снижает гигроскопичность, предотвращает пылеобразование.

После визуального контроля образцов с полностью выгоревшим связующим следует отметить, что материал изделия становится рыхлым, происходит значительная деформация формы изделия (см. рисунок 3.13). При действии нагрузок происходит уплотнение слоя материала, уменьшение толщины теплоизоляционного слоя.

Определение коэффициента теплопроводности для образцов теплоизоляционных цилиндров из базальтового волокна при разной степени разложения полимерного связующего проводилось на установке, описанной в параграфе 3.1.

На рисунке 3.15 представлен внешний вид образцов вырезных теплоизоляционных цилиндров из базальтового волокна до выдержки в печи и после полного выгорания связующего.



а)



б)



в)

Рис. 3.15 Внешний вид образцов теплоизоляционных цилиндров из базальтового волокна до и после полного выгорания связующего:  
а) образец 1; б) образец 2; в) образец 3

На рисунке 3.15 видно, что ориентация расположения волокон – хаотичная, для некоторых участков наблюдается параллельное расположение волокон относительно направления теплового потока.

На рисунках 3.16-3.18 представлено изменение коэффициента теплопроводности при полном выгорании связующего. Измерения проводились в четырех точках по периметру цилиндра (на 12, 3, 6 и 9 часов).

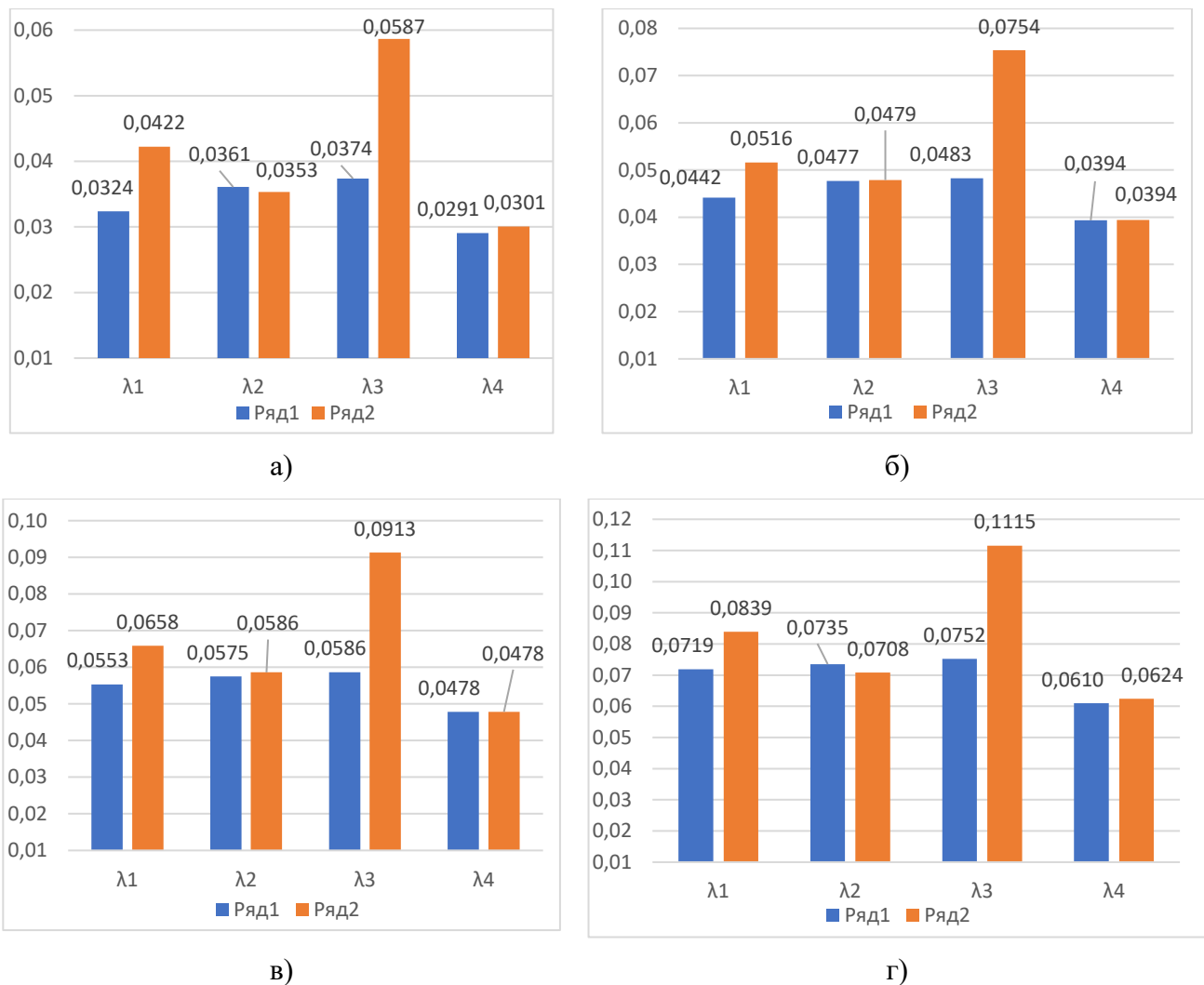


Рис. 3.16 Коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , Вт/м·°С, теплоизоляционного цилиндра из базальтового волокна (образец 1), ряд 1 – до выгорания связующего, ряд 2 – после 12 часов при температуре 650 °С (связующее полностью выгорело). Расположение датчиков теплового потока и термпар на поверхности 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) 100 °С; б) 200 °С; в) 300 °С; г) 400 °С

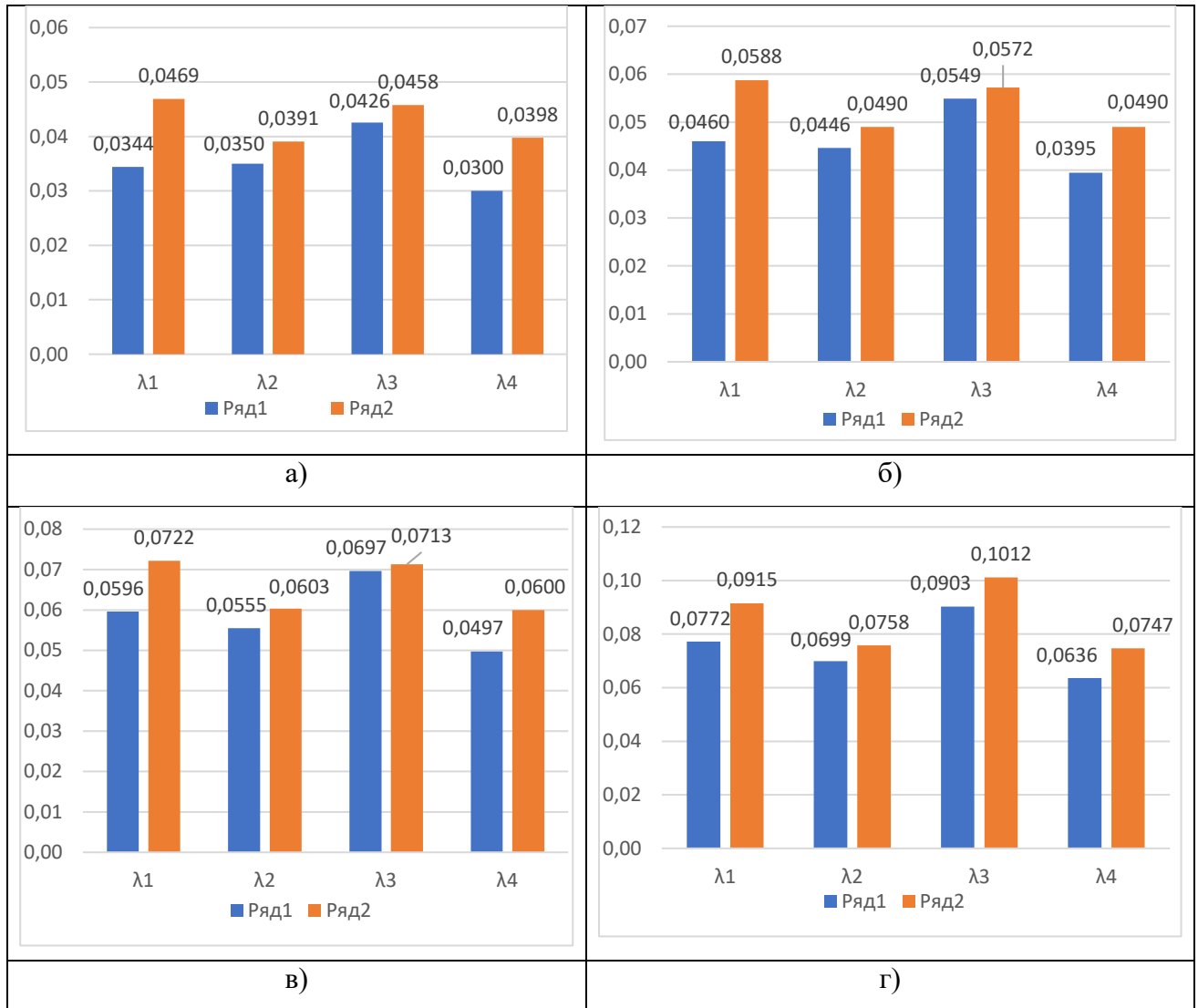


Рис. 3.17 Коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , Вт/м·°C, теплоизоляционного цилиндра из базальтового волокна (образец 2), ряд 1 – до выгорания связующего, ряд 2 – после 12 часов при температуре 650 °C (связующее полностью выгорело). Расположение датчиков теплового потока и термопар на поверхности 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) 100 °C; б) 200 °C; в) 300 °C; г) 400 °C

Для всех образцов и до и после выгорания связующего характерно различие в величине коэффициента теплопроводности по периметру цилиндра. Для всех исследованных образцов, до выдержки их в печи, коэффициент теплопроводности выше для участков на 9 часов ( $\lambda_3$ ), что можно связать с конструктивными особенностями рассматриваемых цилиндров (наличие разреза), а также на 12 часов ( $\lambda_1$ ), что может быть связано с ориентацией расположения волокон. На рисунке 3.15 видно, что для области на 12 часов ( $\lambda_1$ ) волокна преимущественно

располагаются параллельно относительно направления теплового потока, что характерно для всех рассмотренных образцов. При расположении волокон параллельно направлению теплового потока теплопроводность может быть выше на 25-40 % чем при поперечном расположении волокон.

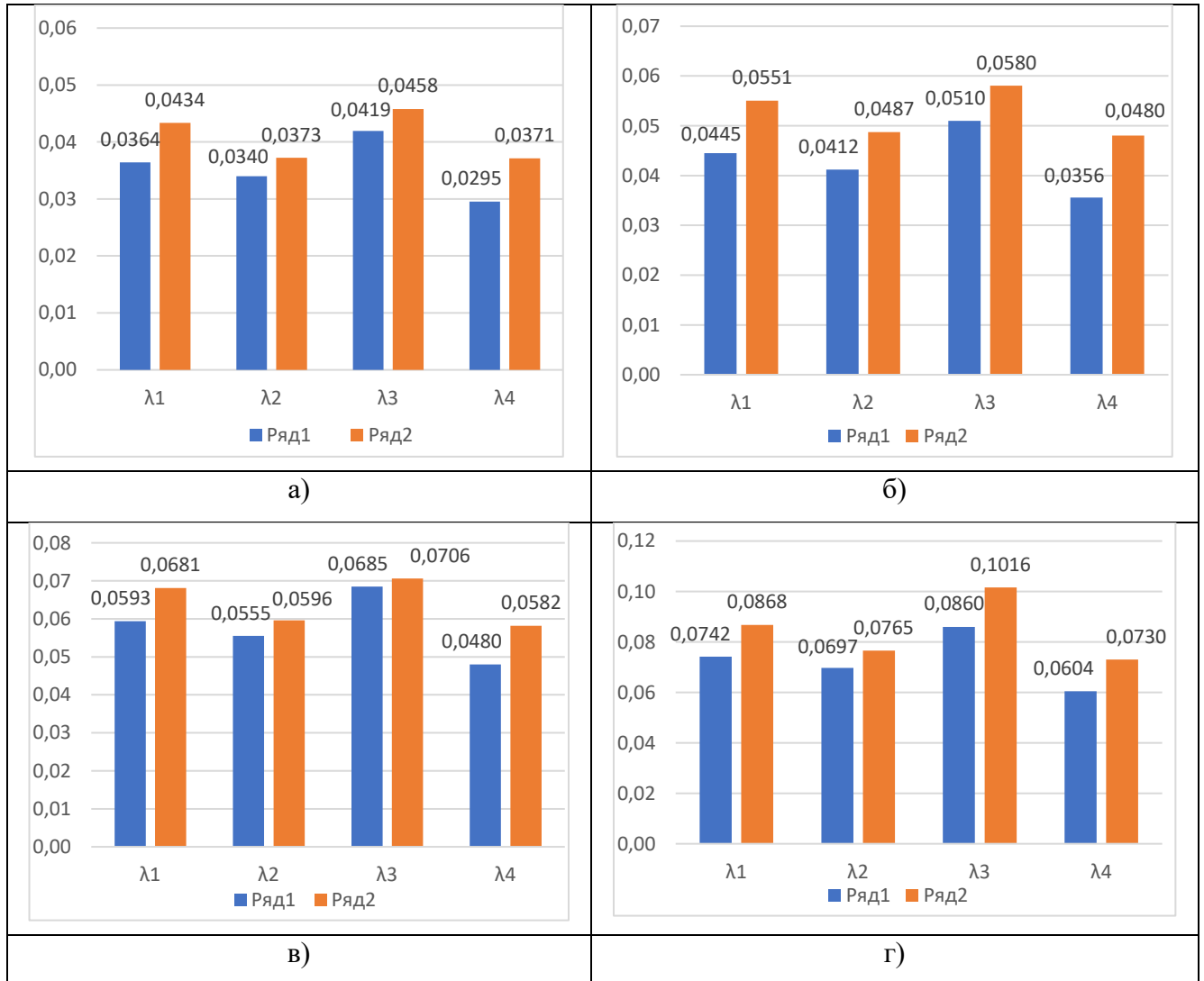


Рис. 3.18 Коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , Вт/м·°C, теплоизоляционного цилиндра из базальтового волокна (образец 3), ряд 1 – до выгорания связующего, ряд 2 – после 12 часов при температуре 650 °C (связующее полностью выгорело). Расположение датчиков теплового потока и термопар на поверхности 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) 100 °C; б) 200 °C; в) 300 °C; г) 400 °C

После выгорания связующего наблюдается увеличение коэффициента теплопроводности в среднем по периметру всего образца до 20%.

Из рисунка 3.16 видно, что для образца 1 увеличение коэффициента теплопроводности после выгорания связующего наблюдается на 12 и 9 часов ( $\lambda_1$  и  $\lambda_3$  соответственно). Для  $\lambda_3$  коэффициент теплопроводности после выгорания связующего увеличился на 55 %. Если сопоставить эти значения с рисунком 3.15 (а), то 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 образцов 2 и 3 (рис. 3.17-3.18) после выгорания связующего также наблюдается увеличение коэффициента теплопроводности. Для этих образцов также характерно увеличение коэффициента теплопроводности на участках, имеющих скопления сквозных пор и капилляров, образовавшихся при выгорании связующего и связанного с этим разрыхлением материала. Для образца 2 в среднем  $\lambda_1$  увеличилась после выгорания связующего на 25% и  $\lambda_4$  на 23%. Для образца 3 в среднем  $\lambda_1$  увеличилась после выгорания связующего на 18% и  $\lambda_4$  на 25%.

Также было исследовано изменение коэффициента теплопроводности базальтовых теплоизоляционных цилиндров при разной степени выгорания связующего.

При выгорании 20% из всей массы полимерного связующего (степень конверсии 0,2) внешний вид материала представлен на рисунке 3.13-3.14.

При выгорании 60% из всей массы полимерного связующего (степень конверсии 0,6) внешний вид материала представлен на рисунке 3.13-3.14.

По результатам проведенных экспериментов в таблицах 3.3-3.6 приведены значения коэффициента теплопроводности теплоизоляционных цилиндров из базальтового волокна до выгорания связующего, при выгорании 20% связующего (степени конверсии 0,2), при выгорании 60% связующего (степень конверсии 0,6) и при полностью выгоревшем связующем.

Таблица 3.3 Значения коэффициента теплопроводности теплоизоляционных цилиндров из базальтового волокна до выгорания связующего

Температура изолируемой трубы, °С	Средняя температура изоляционного слоя °С, образец 1	Средняя температура изоляционного слоя °С, образец 2	Средняя температура изоляционного слоя °С, образец 3	Коэффициент теплопроводности Вт / (м ·°С), образец 1	Коэффициент теплопроводности Вт / (м ·°С), образец 2	Коэффициент теплопроводности Вт / (м ·°С), образец 3
100	68	68	70	0,0337	0,0355	0,0355
200	127	130	129	0,0449	0,0462	0,0431
300	190	192	192	0,0548	0,0586	0,0578
400	257	260	257	0,0704	0,0752	0,0726

Таблица 3.4 Значения коэффициента теплопроводности теплоизоляционных цилиндров из базальтового волокна при полностью выгоревшем связующем

Температура изолируемой трубы, °С	Средняя температура изоляционного слоя °С, образец 1	Средняя температура изоляционного слоя °С, образец 2	Средняя температура изоляционного слоя °С, образец 3	Коэффициент теплопроводности Вт / (м ·°С), образец 1	Коэффициент теплопроводности Вт / (м ·°С), образец 2	Коэффициент теплопроводности Вт / (м ·°С), образец 3
100	69	71	69	0,0416	0,0429	0,0409
200	131	135	133	0,0536	0,0535	0,0525
300	194	200	198	0,0659	0,0659	0,0641
400	260	271	266	0,0822	0,0858	0,0848

Таблица 3.5 Значения коэффициента теплопроводности теплоизоляционных цилиндров из базальтового волокна при выгорании 20% связующего ( $\alpha=0,2$ )

Температура изолируемой трубы, °С	Средняя температура изоляционного слоя °С, образец 1	Средняя температура изоляционного слоя °С, образец 2	Средняя температура изоляционного слоя °С, образец 3	Коэффициент теплопроводности Вт / (м ·°С), образец 1	Коэффициент теплопроводности Вт / (м ·°С), образец 2	Коэффициент теплопроводности Вт / (м ·°С), образец 3
100	68	70	70	0,0369	0,0405	0,0387
200	130	132	130	0,0537	0,0509	0,0528
300	198	196	198	0,0699	0,0676	0,0690
400	269	268	267	0,0899	0,0859	0,0873



Таблица 3.6 Значения коэффициента теплопроводности теплоизоляционных цилиндров из базальтового волокна при выгорании 60% связующего ( $\alpha=0,6$ )

Температура изолируемой трубы, °С	Средняя температура изоляционного слоя °С, образец 1	Средняя температура изоляционного слоя °С, образец 2	Средняя температура изоляционного слоя °С, образец 3	Коэффициент теплопроводности Вт / (м ·°С), образец 1	Коэффициент теплопроводности Вт / (м ·°С), образец 2	Коэффициент теплопроводности Вт / (м ·°С), образец 3
100	69	69	69	0,0369	0,0380	0,0385
200	129	130	132	0,0488	0,0473	0,0482
300	193	195	197	0,0598	0,0589	0,0609
400	261	263	266	0,0756	0,0731	0,0753

На рисунке 3.19 показано изменение коэффициента теплопроводности базальтовых теплоизоляционных цилиндров в зависимости от степени выгорания связующего при температурах изолируемой поверхности 100, 200, 300, 400 °С.

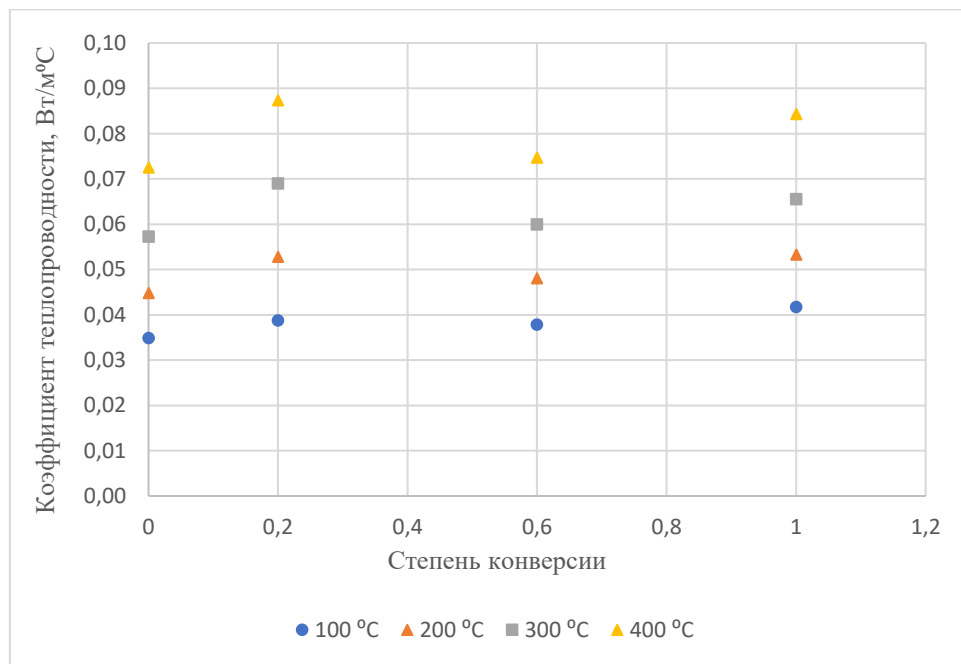


Рис. 3.19 Коэффициент теплопроводности базальтовых теплоизоляционных цилиндров в зависимости от степени выгорания связующего при температурах изолируемой поверхности 100, 200, 300, 400 °С

Показанная на рисунке 3.19 зависимость может быть обусловлена следующими причинами. При изготовлении теплоизоляционных материалов ковер из каменной ваты, пропитанный синтетическим связующим, проходит тепловую обработку с целью сушки и отверждения синтетического связующего.

Отверждение связующего происходит при температуре 180-220 °С, продолжительность тепловой обработки составляет от 6 до 18 минут [45]. В работе [85] приводится зависимость коэффициента теплопроводности при разной степени отверждения, при увеличении степени отверждения коэффициент теплопроводности увеличивается более чем в три раза с 0,08 до 0,25 Вт/(м·К). В этой же работе отмечается повышение различия в значениях коэффициента теплопроводности при разной степени отверждения с увеличением температуры испытаний. В литературе [86, 87] отмечается, что теплофизические свойства полимеров могут изменяться еще до потери массы.

Как отмечалось ранее, для достижения степени конверсии 0,2 образцы выдерживались в печи при температуре 250 °С в течении 12 часов. Показанное на рисунке 3.19 повышение теплопроводности для образцов со степенью конверсии 0,2 может быть обусловлено повышением степени отверждения связующего в процессе 12-часовой выдержки при 250 °С и соответственно повышением теплопроводности связующего.

При увеличении массы выгоревшего связующего (степень конверсии 0,6) снижается вклад кондуктивной теплопроводности полимерного связующего в процессе передачи теплоты (минимум коэффициента теплопроводности при  $\alpha=0,6$ ).

С помощью устройства для измерения плотности теплового потока, описанного в параграфе 2.6 (Патент №204511), для теплоизоляционных цилиндров из базальтового волокна с разной степенью выгорания связующего была произведена серия экспериментов для оценки изменения плотности теплового потока в зависимости от сжимающей нагрузки на материал.

Внешний вид устройства представлен на рисунке 3.20. На внутренней части манжеты расположены датчики теплового потока. С помощью нагнетателя в пневмокамеру компрессионной манжеты нагнетается воздух. Требуемое давление в пневмокамере контролировалось с помощью манометра. Результаты представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 Значения поверхностной плотности теплового потока для теплоизоляционных цилиндров из базальтового волокна с разной степенью выгорания связующего в зависимости от нагрузки на материал

Время, мин	при выгорании 20% связующего ( $\alpha=0,2$ ), Вт/м <sup>2</sup>								
	Образец 1			Образец 2			Образец 3		
	Давление в пневмокамере			Давление в пневмокамере			Давление в пневмокамере		
	0	5,3 кПа	9,3 кПа	0	5,3 кПа	9,3 кПа	0	5,3 кПа	9,3 кПа
1	269	275	285	262	278	290	264	276	284
2	269	273	287	264	279	289	263	277	285
3	270	274	288	264	280	289	262	276	284
4	270	276	287	264	278	290	263	275	284
5	270	276	286	265	279	290	264	276	285
6	272	275	288	265	279	288	264	276	285
7	272	276	288	264	279	289	263	275	283
8	271	276	286	265	280	291	263	275	283
Время, мин	при выгорании 60% связующего ( $\alpha=0,6$ )								
	Образец 1			Образец 2			Образец 3		
	Давление в пневмокамере			Давление в пневмокамере			Давление в пневмокамере		
	0	5,3 кПа	9,3 кПа	0	5,3 кПа	9,3 кПа	0	5,3 кПа	9,3 кПа
1	277	286	296	261	280	297	225	262	286
2	277	286	296	262	278	295	232	262	286
3	276	286	296	263	279	298	235	261	287
4	276	285	295	262	281	297	238	262	287
5	278	284	294	263	280	296	241	263	286
6	278	284	295	264	279	296	241	262	288
7	277	286	296	264	280	298	241	263	288
8	277	287	296	263	280	298	240	264	286
Время, мин	при полностью выгоревшем связующем								
	Образец 1			Образец 2			Образец 3		
	Давление в пневмокамере			Давление в пневмокамере			Давление в пневмокамере		
	0	5,3 кПа	9,3 кПа	0	5,3 кПа	9,3 кПа	0	5,3 кПа	9,3 кПа
1	271	320	349	274	325	355	276	360	403
2	271	319	350	273	327	356	279	361	406
3	269	318	348	274	327	357	279	363	406
4	270	319	348	275	324	356	278	360	402
5	271	319	350	274	326	356	279	360	402
6	270	318	348	274	327	359	279	363	405
7	271	319	348	275	325	358	278	363	403
8	272	320	349	275	326	355	279	359	402

Из полученных результатов видно, что при увеличении сжимающей нагрузки на теплоизоляционные цилиндры величина поверхностной плотности теплового потока увеличивается в среднем на следующие значения:

для образцов при выгорании 20% связующего – на 4%, при давлении в пневмокамере 5,3 кПа; на 8%, при давлении в пневмокамере 9,3 кПа;

для образцов при выгорании 60% связующего – на 7%, при давлении в пневмокамере 5,3 кПа; на 14%, при давлении в пневмокамере 9,3 кПа;

для образцов с полностью выгоревшим связующим– на 22%, при давлении в пневмокамере 5,3 кПа; на 35%, при давлении в пневмокамере 9,3 кПа;



Рис. 3.20 Внешний вид устройства для измерения плотности теплового потока

Определение коэффициента теплопроводности для плоских образцов с горизонтально-слоистой структурой распределения волокон проводилось на установке, описанной в параграфе 3.2.

Испытания проводились на образцах теплоизоляционных матов из стекловолокна плотностью  $25 \text{ кг/м}^3$ , а также на плитах из базальтового волокна плотностью  $50 \text{ кг/м}^3$ . Результаты представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 Значения коэффициента теплопроводности образцов плотностью 25 кг/м<sup>3</sup>, плотность 50 кг/м<sup>3</sup>

Температура изолируемой поверхности, °С	Средняя температура изоляционного слоя °С, образец плотностью 25 кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности Вт / (м · °С), образец плотностью 25 кг/м <sup>3</sup>	Средняя температура изоляционного слоя °С, образец плотностью 50 кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности Вт / (м · °С), образец плотностью 50 кг/м <sup>3</sup>
50	37	0,0434	37	0,0393
100	65	0,0495	67	0,0481
150	94	0,0573	96	0,0565
200	125	0,0701	124	0,0648
250	155	0,078	155	0,0738
300	183	0,087	185	0,0827
350	217	0,1007	214	0,0912

Также была проведена серия экспериментов для оценки влияния деградации структуры материала при термической деструкции полимерного связующего на теплозащитные свойства материалов с горизонтально-слоистой структурой распределения волокон. Подготовленные образцы из базальтовых плит плотностью 50 кг/м<sup>3</sup> выдерживались при температуре 650 °С до полного выгорания полимерного связующего. Внешний вид образцов до и после выдержки в печи представлен на рисунке 3.21

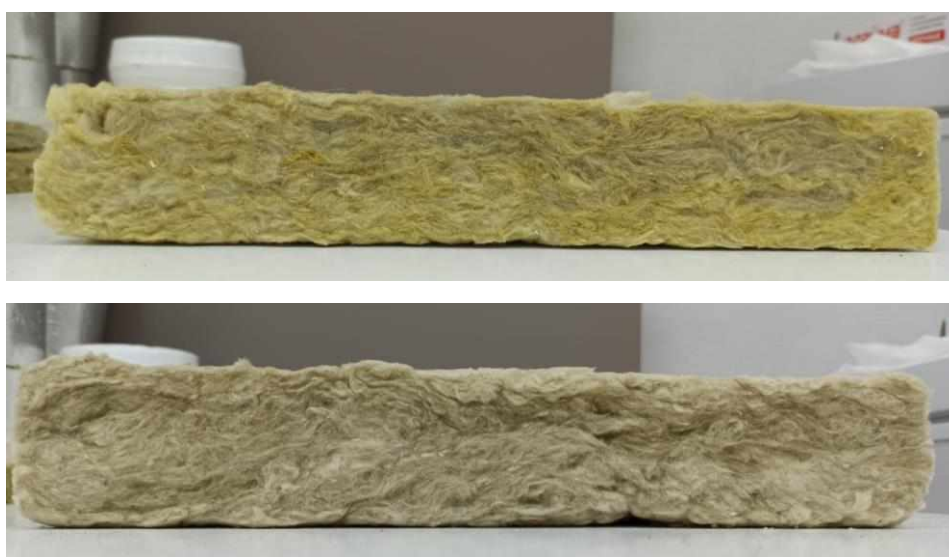


Рис. 3.21 Внешний вид образцов теплоизоляционных цилиндров из базальтового волокна до (верхний) и после полного выгорания связующего (нижний)

После визуального контроля для плоских образцов с горизонтально-слоистой структурой распределения волокон также отмечается разрыхление структуры материала. При действии нагрузок происходит уплотнение слоя материала, уменьшение толщины теплоизоляционного слоя. Для оценки изменения теплозащитных свойств материала с выгоревшим связующим при воздействии на него нагрузок была проведена серия экспериментов. На образец помещалась металлическая плита, создающая нагрузку в 500 Па. Под действием приложенной нагрузки материал с выгоревшим связующим уплотняется, толщина изделия уменьшилась с 50 мм до 43 мм (для новых образцов при воздействии на них нагрузки в 500 Па изменение толщины изделия не происходит). Определение коэффициента теплопроводности для образцов при воздействии нагрузки в 500 Па проводилось на установке, описанной в параграфе 3.2 (результаты представлены в таблице 3.9). При воздействии на образец нагрузки в 500 Па термическое сопротивление образца уменьшилось с 0,77 до 0,68 ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}$ )/Вт.

Таблица 3.9 Значения коэффициента теплопроводности плит из базальтового волокна плотность  $50 \text{ кг/м}^3$  при полностью выгоревшем связующем без нагрузки, и при воздействии нагрузки 500 Па

Температура изолируемой поверхности, °С	Средняя температура изоляционного слоя °С, образец с выгоревшим связующим без нагрузки	Коэффициент теплопроводности Вт / ( $\text{м} \cdot \text{°C}$ ), образец с выгоревшим связующим без нагрузки	Средняя температура изоляционного слоя °С, образец с выгоревшим связующим при нагрузке в 500 Па	Коэффициент теплопроводности Вт / ( $\text{м} \cdot \text{°C}$ ), образец с выгоревшим связующим при нагрузке в 500 Па
50	38	0,0412	38	0,0408
100	68	0,0492	69	0,0487
150	98	0,0571	98	0,0562
200	127	0,0650	127	0,0636
250	157	0,0732	158	0,0723
300	187	0,0813	189	0,0808
350	217	0,0893	218	0,0889

При полном выгорании связующего, исчезает скрепление между волокнами материала, что приводит к разрыхлению материала, увеличению количества сквозных пор и капилляров и интенсификации конвективного теплообмена.

При изоляции высокотемпературных объектов происходит постепенная деградация структуры теплоизоляционного материала вследствие термической деструкции полимерного связующего. На рисунке 3.22 видны изменения, произошедшие с материалом при одностороннем воздействии высоких температур.

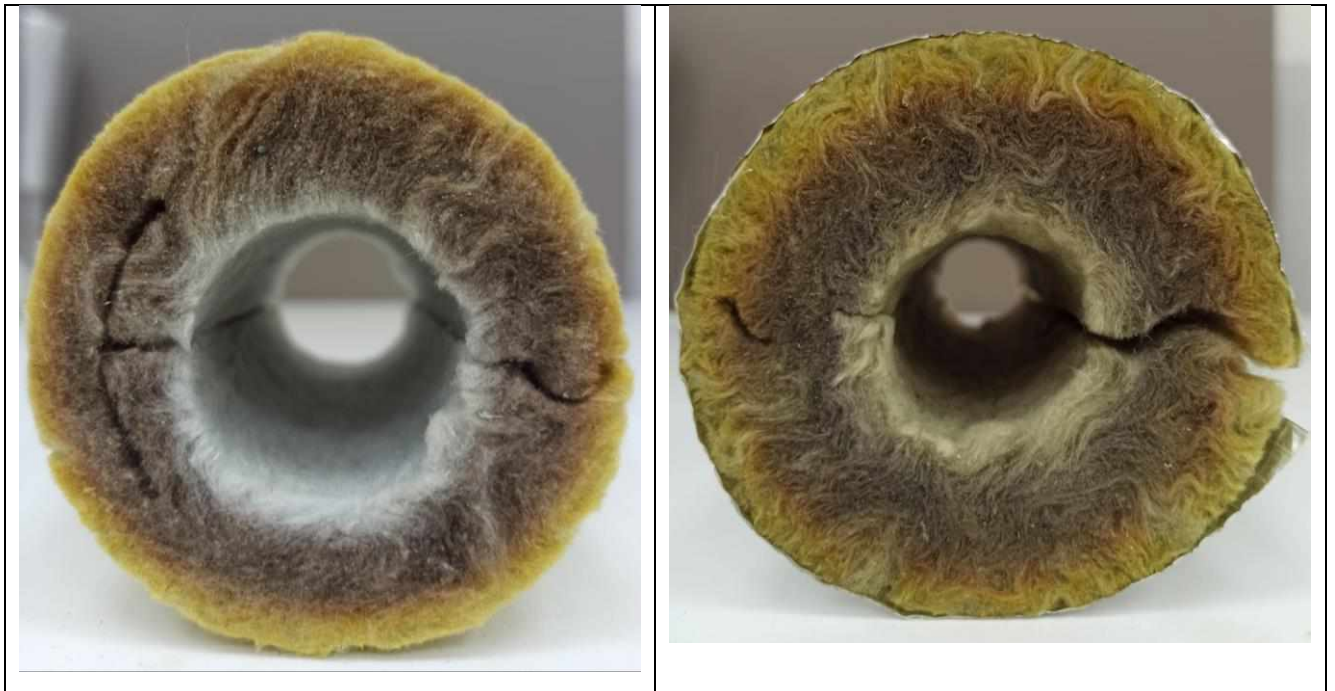


Рис. 3.22 Образцы после одностороннего воздействия высоких температур

Показанные на рисунке 3.22 образцы использовались для изоляции металлической трубы, на поверхности которой поддерживалась температура от 50 до 400 °С. По результатам проведенных экспериментов, для данных образцов при температуре изолируемой поверхности 400 °С температура среднего слоя составляла 260 °С. Если сопоставить изменения цвета на рисунке 3.22 с рисунком 3.13, можно сказать о постепенном выгорании полимерного связующего для большей части материала.

Образцы теплоизоляционных материалов бывших в эксплуатации и используемых для изоляции паропроводов на объектах шинного комплекса

представлены на рисунке 3.23. Образцы изоляции взяты с трубопровода, транспортирующего перегретый пар с температурой 315 °С.



Рис. 3.23 Базальтовое волокно бывшее в эксплуатации

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. В связи с этим, полное выгорание связующего может расцениваться как критерий предельно допустимого ухудшения теплозащитных свойств изоляционных изделий.

Продолжительность старения материала в зависимости от температур эксплуатации до достижения полного выгорания связующего будет рассмотрена в главе 4.

### **3.6 Выводы по главе**

1. Проведены экспериментальные исследования по определению теплопроводности волокнистых изоляционных материалов в том числе и при деградации структуры материала.



2. Полученные результаты показывают зависимость коэффициента теплопроводности от температуры, а также от плотности материала.

3. Дана оценка изменения коэффициента теплопроводности волокнистой тепловой изоляции при деградации структуры материала вследствие термической деструкции полимерного связующего под действием высоких температур.

4. Показано, что при полном выгорании связующего материал изделия становится рыхлым, происходит значительная деформация формы изделия. При действии нагрузок происходит уплотнение слоя материала, уменьшение толщины теплоизоляционного слоя.

5. Для изделий с хаотичным расположением волокон коэффициент теплопроводности после выгорания связующего может увеличиться на 20-55 %. В среднем по периметру всего образца после выгорания связующего наблюдается увеличение коэффициента теплопроводности на 20%.

6. Показано изменение коэффициента теплопроводности базальтовых теплоизоляционных цилиндров в зависимости от степени выгорания связующего. 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 волокно, повышает жесткости и прочности изделия, повышает гидрофобность материала, при его выгорании возможно частичное разрушение или вымывание слоя теплоизоляционного материала при увлажнении капельной влагой. В связи с этим, полное выгорание связующего может расцениваться как критерий предельно допустимого ухудшения теплозащитных свойств изоляционных изделий.

#### 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ВОЛОКНИСТЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Теплоизоляционные материалы, применяемые в настоящее время для изоляции высокотемпературных объектов, обладают достаточно низкими значениями теплопроводности позволяющими добиться минимума тепловых потерь в условиях эксплуатации при высоких температурах. Однако для выбора оптимального теплоизоляционного материала важным становится не только низкий коэффициент теплопроводности, но и долговечность выбранного материала в проектируемых условиях эксплуатации, позволяющая обеспечивать требуемые теплозащитные свойства в течении всего срока эксплуатации. Поэтому прогнозирование долговечности волокнистых теплоизоляционных материалов, применяемых для изоляции высокотемпературных объектов, можно считать достаточно актуальной задачей.

Множество работ посвящено прогнозированию долговечности теплоизоляционных материалов, в том числе и волокнистых, применяемых в качестве тепловой изоляции в ограждающих конструкциях зданий [88-93].

В рассматриваемых работах температурный диапазон эксплуатации или ограничивается условиями эксплуатации в ограждающих конструкциях или не превышает 150 °С.

В указанных работах долговечность теплоизоляционных материалов связана с изменением коэффициента теплопроводности в процессе эксплуатации.

В методике [91] разработанной ОАО «Теплопроект» представлены значения константы работоспособности, характеризующей динамику снижения коэффициента теплопроводности, различных видов теплоизоляционных материалов, в том числе и волокнистой тепловой изоляции, для трубопроводов систем отопления, горячего водоснабжения и централизованного теплоснабжения.

В работах [88, 90] долговечность тепловой изоляции определяется временем до наступления критического приращения коэффициента теплопроводности и выражается через коэффициент зависимости приращения коэффициента

теплопроводности от времени испытаний (Вт/м·°С·сут) проведенных при температуре 50 °С.

Полученные в результате ускоренных изотермических испытаний значения коэффициентов теплопроводности аппроксимируются в виде линейной зависимости [88]. Однако не показано, что данная линейная зависимость, полученная при ускоренных испытаниях, может быть экстраполирована на более длительный срок службы.

Согласно кинетической термofлуктуационной теории и принципу температурно-временной аналогии продолжительность старения материала определяется по формуле [94]:

$$\tau = \tau_m \exp \left[ \frac{E}{R} (T^{-1} - T_m^{-1}) \right], \quad (4.1)$$

где  $\tau_m$  – минимальная долговечность (минимальное время разрушения твердого тела (при  $T=T_m$ )), с;  $T_m$  – предельная температура существования твёрдого тела (температура разложения), К;  $T$  – температура, воздействию которой подвергается теплоизоляционный материал, К;  $R$  – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К);  $E$  – энергия активации процесса разрушения, кДж/моль

Автор [88] использует формулу (4.1) и полученные при ускоренных изотермических испытаниях показатели долговечности при тепловом старении для определения продолжительности старения теплоизоляционного слоя в конструкции наружной стены.

Выбранная для изотермических испытаний температура 50 °С допустима для моделирования условий эксплуатации теплоизоляционных материалов только в наружных ограждающих конструкциях, и не отражает температурных условий, которым подвергается промышленная тепловая изоляция.

Поэтому экспериментальные значения показателей долговечности при тепловом старении, полученные автором [88], могут характеризовать скорость увеличения коэффициента теплопроводности, только для температур эксплуатации

до 50 °С. При более высоких температурах в материале возможны значительные структурные изменения.

Волокна, применяемые при производстве волокнистых теплоизоляционных материалов, имеют повышенную стойкость к высоким температурам, а также к другим агрессивным воздействиям [45]. Однако на долговечность волокнистой тепловой изоляции оказывают влияние не только свойства минерального волокна, но также эксплуатационная стойкость полимерного связующего, скрепляющего отдельные волокна в теплоизоляционное изделие [92]. Процесс старения волокнистых теплоизоляционных материалов будет определяться старением полимерного связующего. Повышенная температура ускоряет процесс термической деструкции полимерного связующего [95]. Также присутствие кислорода снижает термостойкость полимеров и ускоряет процесс термической деградации [95].

Изменение температуры непосредственно влияет на все виды молекулярного движения в системе, вызывая в ней физические и химические процессы. Энергия молекулярного движения увеличивается с повышением температуры, при достаточно высоком повышении температуры энергия молекулярного движения начинает приближаться к энергии химических связей, так что последние разрываются, что приводит к термическому разложению. Изменение температуры не только стимулирует различные физические и химические процессы, но и влияет на их кинетику [95].

Влияние высоких температур эксплуатации на структуру волокнистых теплоизоляционных материалов, содержащих полимерное связующее, можно оценить по результатам термогравиметрического анализа, произведенного в окислительной среде.

Термогравиметрический анализ (ТГА) один из наиболее распространённых методов термического анализа для изучения процессов термического разложения [95-99].

Долговечность волокнистых теплоизоляционных материалов в зависимости от температур эксплуатации предлагается оценивать через определение

термической устойчивости полимерного связующего в составе теплоизоляционного материала.

#### 4.1 Определение термической устойчивости материалов из результатов термогравиметрического анализа

Под термической устойчивостью понимается время, при котором происходит предельно допустимое ухудшение свойств при выбранной температуре. Также известна как время жизни материала или долговечность материала [100].

Для волокнистых теплоизоляционных материалов с полимерным связующим в качестве предельно допустимого ухудшения свойств предлагается рассматривать полное разложение полимерного связующего. И соответственно за температуру предельно допустимого ухудшения свойств принимать температуру, при которой происходит полное разложение полимерного связующего.

Методика для построения кривой термической устойчивости матриц полимерных композитов и органических материалов, по которой можно оценить долговечность (время жизни) материала при заданной температуре представлена в ГОСТ Р 57946-2017 (ASTM 1877-15) [100].

Формула для расчета кривой термической устойчивости:

$$\lg t_f = E / (2.303RT) + \lg[E / (R\beta)] - a , \quad (4.2)$$

где  $\beta$  – скорость нагревания, К/мин;  $E$  – энергия активации, Дж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, 8,314 Дж/(моль·К);  $T$  – температура в интересуемом 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 [100], определяется по формуле:

$$TI = E / (2.303R[\lg t_f - \lg(E / R\beta) + a]), \quad (4.3)$$

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

#### 4.2 Определение энергии активации. Изоконверсионные методы кинетического анализа

Скорость многих термостимулированных процессов может быть определена через уравнение Аррениуса:

$$k(T) = A \exp\left(\frac{-E}{RT}\right), \quad (4.4)$$

где  $k(T)$  – константа скорости;  $A$  – предэкспоненциальный множитель,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $E$  – энергия активации, Дж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, 8,314 Дж/(моль·К);  $T$  – абсолютная температура, К;

В простейшем случае так называемого одностадийного процесса уравнение скорости имеет следующий вид [96]:

$$\frac{d\alpha}{dT} = k(T)f(a), \quad (4.5)$$

где  $\alpha$  – доля прореагировавшего вещества (степень конверсии);  $f(a)$  – модель реакции.

Скорость реакции зависит от конверсии, которая может быть представлена моделью реакции  $f(a)$ . Модель реакции может принимать различные математические формы в зависимости от физического механизма.

В научной литературе [95, 96, 101-103] отмечается, что многие модели реакций не показывают существенной разницы, особенно в определенных диапазонах  $\alpha$ . Все модели в значительной степени упрощают реальность, экспериментальные данные, как правило, не соответствуют моделям точно.

В связи с этим широкое распространение получили методы изоконверсионного кинетического анализа позволяющие исключить модель реакции из кинетических расчетов, основываясь на принципе, что скорость процесса при постоянной степени превращения зависит только от температуры. Использование изоконверсионных методов представляется наилучшим решением для процессов, механизм которых неизвестен и для которых найти адекватную кинетическую модель более чем сложно [101].

Наиболее распространенным дифференциальным изоконверсионным методом является метод Фридмана [101]. Среди интегральных изоконверсионных методов – метод Озавы-Флинна-Уолла [101].

При расчете термической устойчивости по формуле (4.2) энергия активации может быть определена с помощью метода Озавы-Флинна-Уолла [104]:

$$E = -(R/b) \cdot \Delta \lg[\beta] / \Delta(1/T), \quad (4.6)$$

где  $b$  – производная аппроксимации Дойля.

Сравнение изоконверсионных методов для определения энергии активации представлены в следующих работах [95, 96, 98].

В соответствии с рекомендациями комитета по кинетике ИСТАС по проведению кинетических вычислений на основе данных термического анализа надлежит применять методы, использующие несколько программ скорости нагрева (например методы Озавы-Флинна-Уолла; Фридмана; Вязовкина) [101].

### **4.3 Термогравиметрический анализ тепловой изоляции**

Для проведения термогравиметрического анализа в качестве рабочего инструмента использовали TG209F1 Libra (Netzsch GmbH). Метод анализа соответствует требованиям к термогравиметрическим методам анализа полимеров [105]. Термогравиметрический прибор был откалиброван в окислительной атмосфере (воздухе) по сигналу с-DТА с использованием процедуры производителя для пяти калибровочных металлов высокой чистоты - InBi (сплав),

In, Sn, Al и Au для интервала 30-1100 °С со скоростью 10 К / мин в открытых тиглях из оксида алюминия (85 мкл).

Параметры термогравиметрического анализатора: линейность температуры - 0,1 К; разрешение - 0,1 мкг; максимальная масса - 2 г. Точность весов проверяли с помощью сертифицированного  $\text{CaC}_2\text{O}_4 \times \text{H}_2\text{O}$  в соответствии с зонами разложения (3 прогона) по шкале масс и остаточной массой после процедуры калибровки внутренней самобалансировки прибора (EMVcal). Динамический дрейф ТГА (209F1) также проверяли через пустой тигель из оксида алюминия, среднее значение к 3 повторам составило 0,0008 мг. Для анализа исследуемых образцов воспроизводимость составила от  $\pm 0,15\%$  до  $0,28\%$  во всех диапазонах потери массы. Все измерения выполнены в одном тигле.

Для термогравиметрического анализа были испытаны образцы базальтовой тепловой изоляции следующих производителей: BOS (плотность 80, 100, 120 кг/м<sup>3</sup>); Форвард; Экорол; Rockwool; URSA М, БСТВ. Также производился термогравиметрический анализ изоляционного материала, изготовленного на основе кварцевого аэрогеля и армированного нетканым материалом из стекловолокна 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). В таблице 4.1 представлены результаты измерений для материала BOS100 (результаты для других исследуемых материалов представлены в приложении 3).

Полученные термограммы для материалов БСТВ, BOS100, Pyrogel XTE представлены на рисунках 4.1-4.3 (для материалов BOS80, BOS120, Форвард, Экорол, Rockwool, URSA М – в приложении 4). ТГ-кривая показывает изменение массы образца. Масса образца изменяется как функция температуры. Кривая ДТГ (дифференциальная термогравиметрическая кривая) – первая производная ТГ-кривой, показывает скорость разложения и позволяет точно определить шаги разложения. Начало процесса разложения – точки «onset» на ТГ-кривых. Пики на кривых ДТГ («reak») определяют температуру, при которой изменение массы



происходит наиболее быстро. Массовые изменения приводят к появлению ступенек на кривой ТГА и пиков на кривой ДТГ.

Для всех образцов базальтовой изоляции наблюдается уменьшение массы в диапазоне 0,03-0,26 % при температурах до 150 °С, что может быть связано с испарением адсорбированной влаги.

В работах [96, 106] отмечается что, потеря массы для полимеров может быть классифицирована как летучие компоненты, такие как адсорбированная влага, остаточные растворители или низкомолекулярные добавки или олигомеры, которые обычно испаряются при температуре от температуры окружающей среды до 300°С; продукты реакции, такие как вода и формальдегид при отверждении фенольных и аминосмола, которые обычно образуются при температуре от 100°С до 250°С; и образование летучих продуктов разложения в результате разрыва цепи, для чего обычно требуются температуры выше 200 °С, но не выше 800 °С.

Для образцов базальтовой изоляции BOS (плотность 80, 100, 120 кг/м<sup>3</sup>); Форвард; Экорол; Rockwool разложение происходит два этапа. Для образцов материала URSA M в один этап. Величина потери массы, температуры начала процесса разложения, температурные диапазоны основных этапов разложения, а также температуры, при которых изменение массы происходит наиболее быстро представлены для материала BOS100 в таблице 4.1 (для материалов BOS80, BOS120, Форвард, Экорол, Rockwool, URSA M, Pyrogel XTE – в приложении 3).

Образцы БСТВ демонстрируют наименьшие потери массы, менее 1 %, рисунок 4.1, что можно объяснить отсутствием связующих в материале.

Для образцов аэрогелевой изоляции (рис. 4.3) уменьшение массы при температурах до 150-189 °С на 0,27-0,48 % также может объясняться испарением адсорбированной влаги.

Появления пиков при температурах 532,5-553,6 °С (рис. 4.3) на кривой ДТГ может быть вызвано разложением – CH<sub>3</sub> группы и группы SiOH [106].

Пики при температурах 243-266 °С (рис. 4.3), могут объясняться разложением некоторых органических видов, не связанных непосредственно со структурой кремнезема [106].



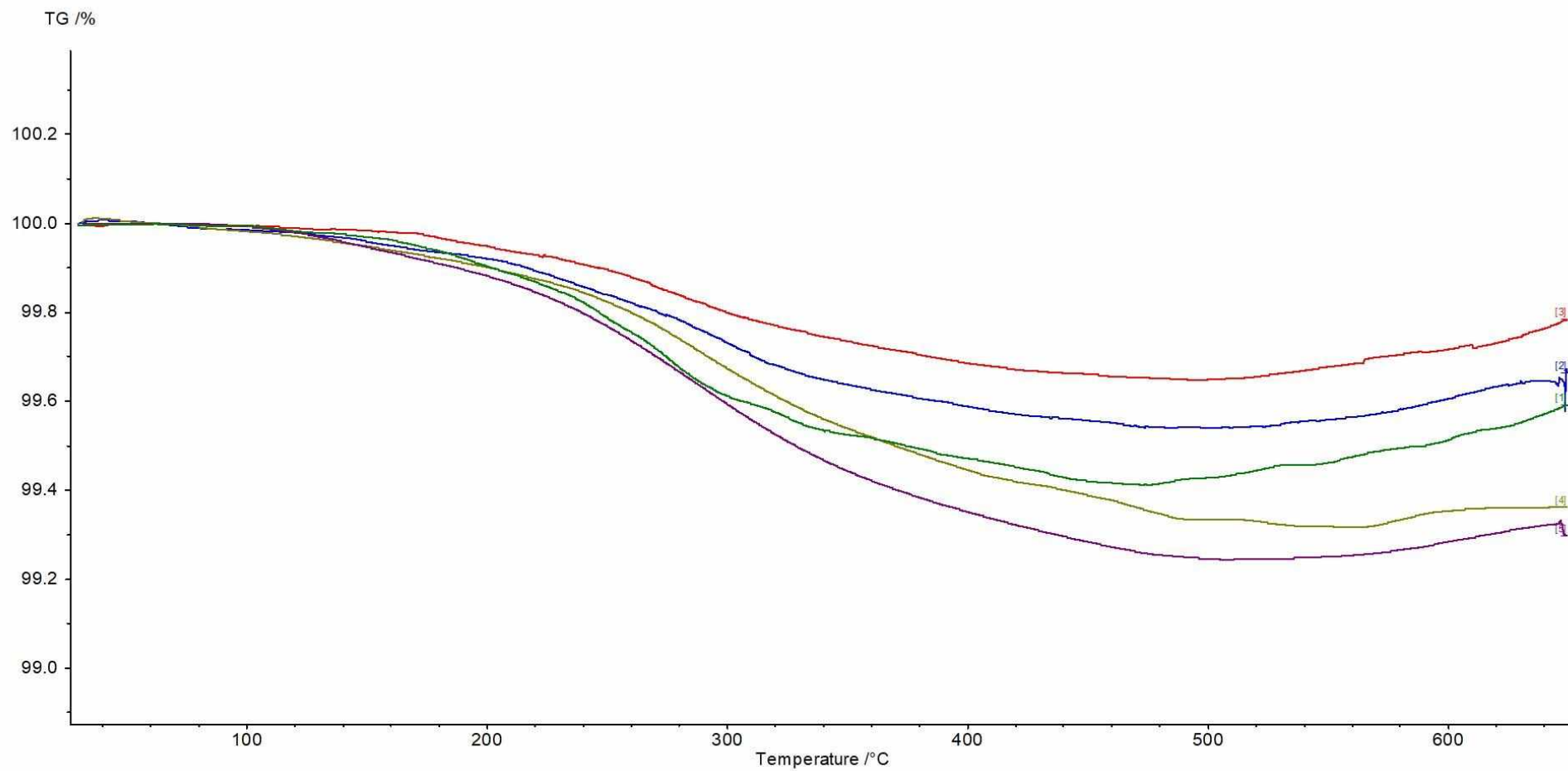


Рис. 4.1 ТГ- кривые изменения массы тепловой изоляции БСТВ при скоростях нагрева 6, 10, 14, 18, 22 °С/мин

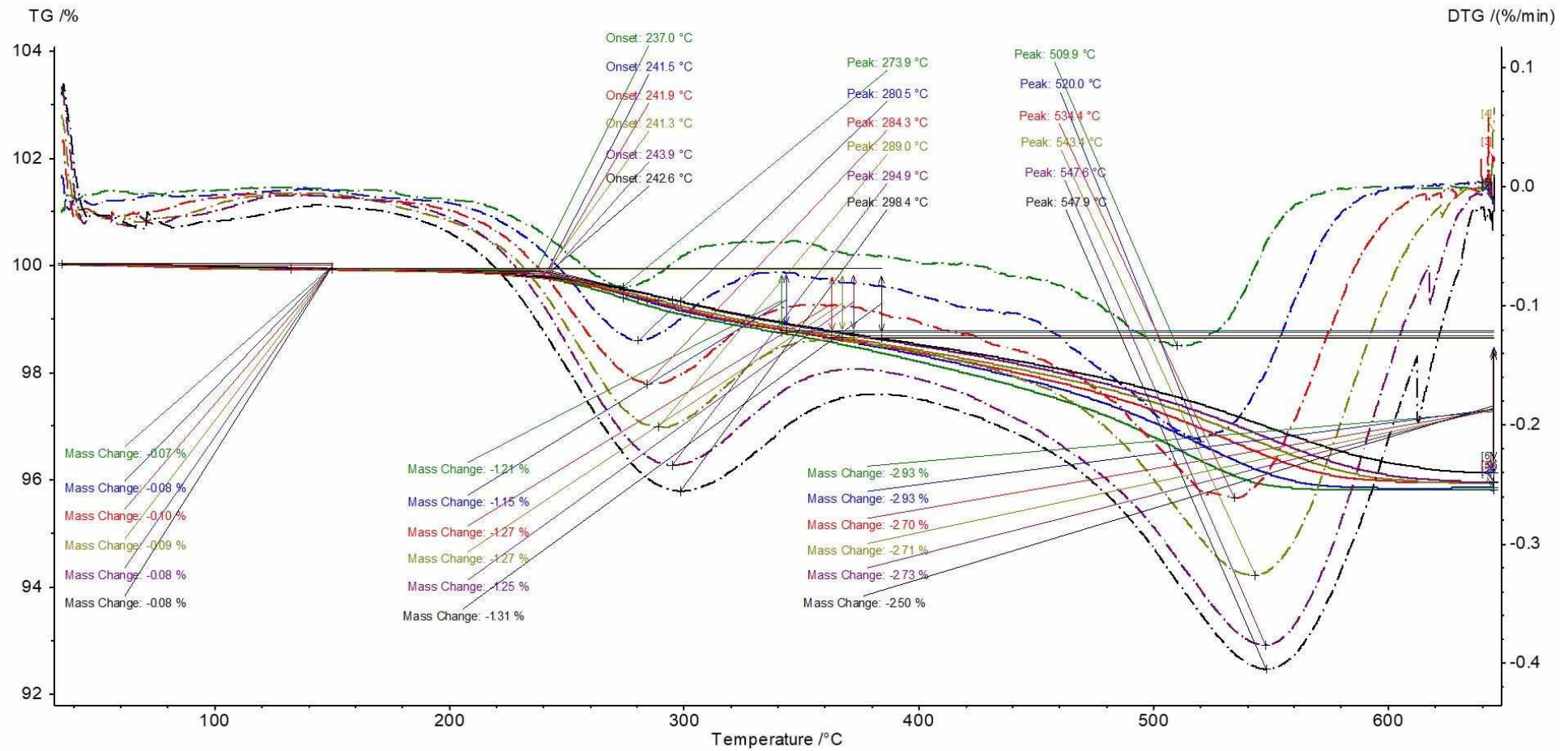


Рис. 4.2 ТГ- и ДТГ-кривые разложения полимерного связующего в базальтовой изоляции BOS 100 при скоростях нагрева 6, 10, 14, 18, 22, 26 °C/мин

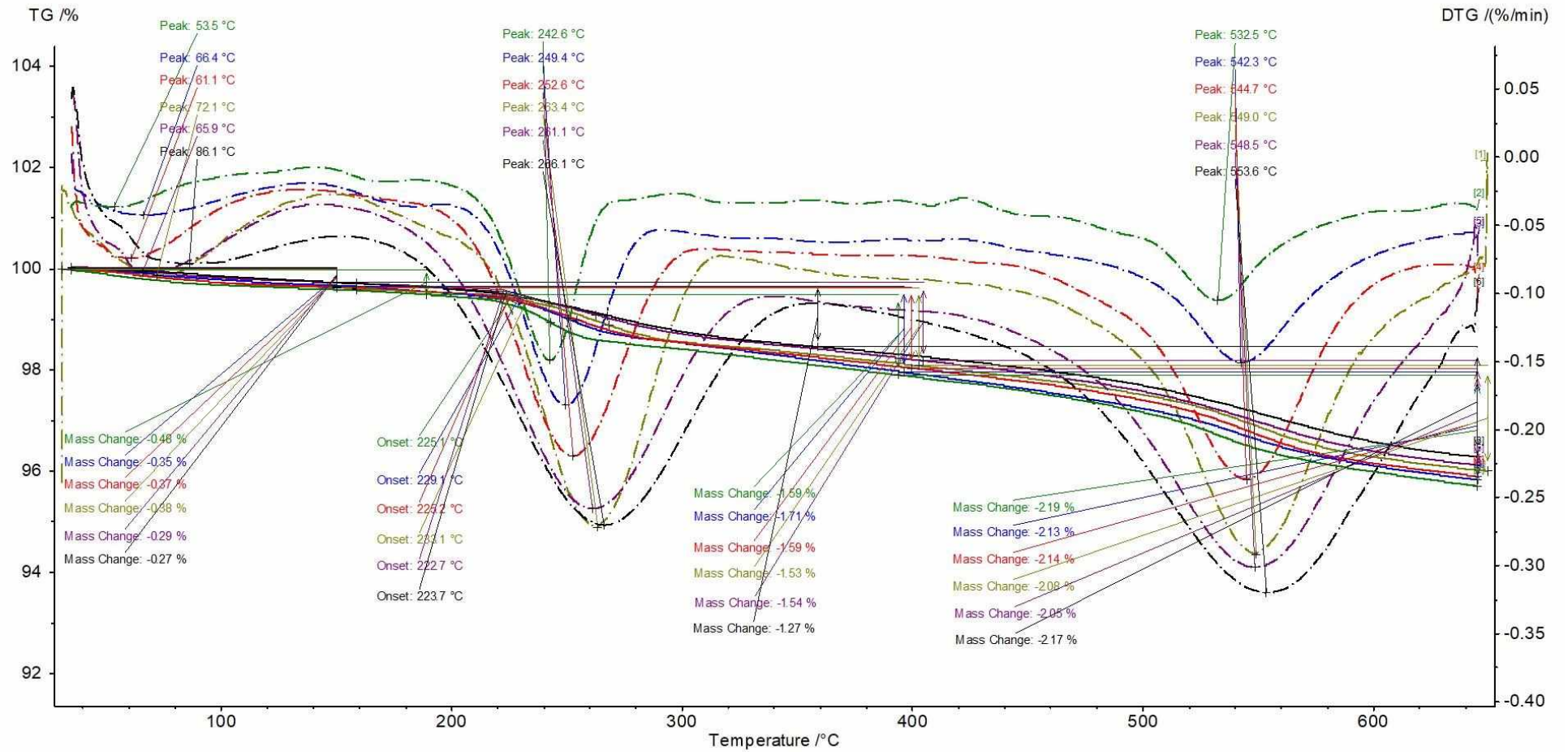


Рис. 4.3 ТГ- и ДТГ-кривые разложения тепловой изоляции Pyrogel XTE производителя Aspen Aerogels Inc. при скоростях нагрева 6, 10, 14, 18, 22, 26 °C/мин

По величине изменения массы при нагреве до 650 °С для всех исследуемых образцов была определена степень конверсии. Результаты для материалов BOS100, Pyrogel XTE представлены на рисунках 4.4-4.5 (для материалов BOS80, BOS120, Форвард, Экорол, Rockwool, URSA М – в приложении 5).

Степень конверсии  $\alpha$  отражает протекание реакции от начального состояния, т.е. до начала реакции  $\alpha=0$ , до конечного состояния, т.е. когда реакция завершена  $\alpha=1$ , определяется как отношение текущего изменения массы к общему изменению массы, произошедшему за весь процесс [95]:

$$\alpha = \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_f}, \quad (4.7)$$

где  $m_0$  и  $m_f$  – соответственно начальная и конечная массы образца, мг;  $m_t$  – масса образца в конкретный момент времени и при конкретной температуре, мг.

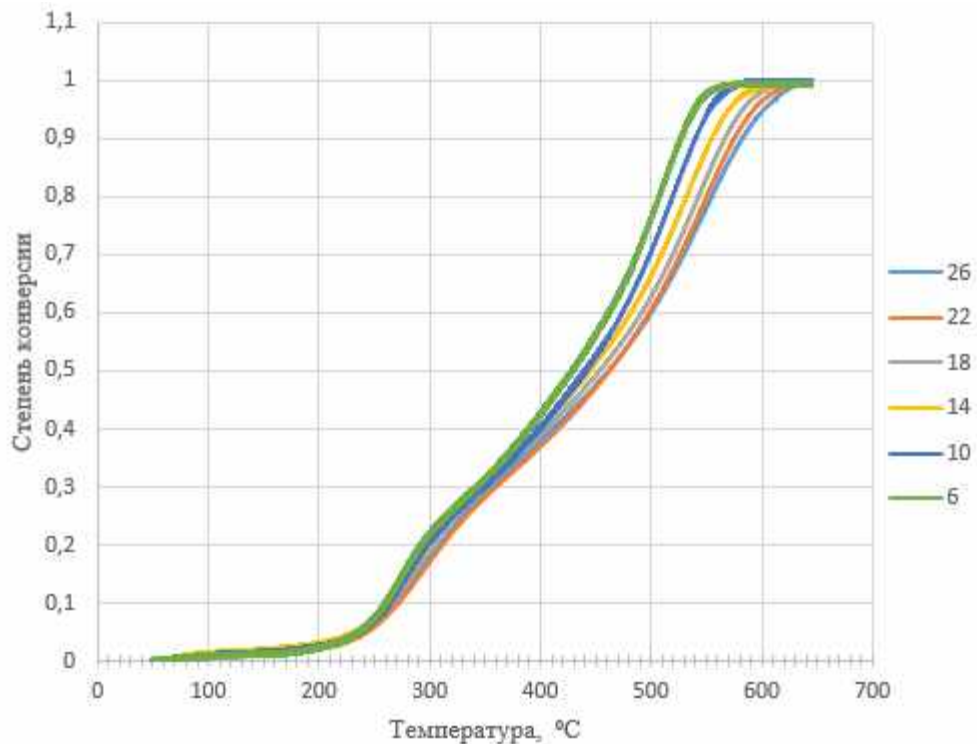


Рис. 4.4 степень конверсии образцов BOS100 при нагреве до 650 °С при скоростях нагрева 6, 10, 14, 18, 22, 26 °С/мин

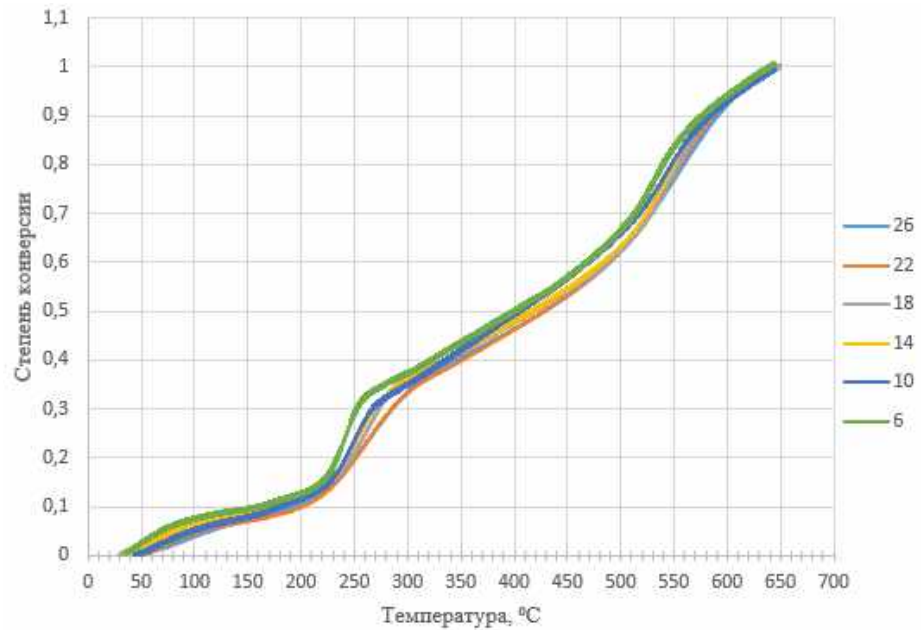


Рис. 4.5 степень конверсии образцов Pyrogel XTE при нагреве до 650 °C при скоростях нагрева 6, 10, 14, 18, 22, 26 °C/мин

В таблице 4.2 представлены температуры для степеней конверсии от 0,1 до 0,95 для всех исследуемых образцов изоляции.

Таблица 4.2 Температуры, °C, при степени конверсии от 0,1 до 0,95 для образцов изоляции при скорости нагрева 14 °C/мин

$\alpha$	BOS 80	BOS 100	BOS 120	Экоролл	Форвард	Rockwool	URSA M25	Pyrogel XTE
0,10	273	263	273	275	293	260	216	172
0,15	292	282	295	295	318	285	245	226
0,20	311	299	317	316	345	309	268	243
0,25	335	319	343	343	370	336	289	256
0,30	364	345	370	372	391	362	309	270
0,35	391	374	396	399	409	382	328	294
0,40	415	400	419	421	424	397	348	336
0,45	436	424	440	441	437	410	367	377
0,50	456	445	459	458	448	421	386	417
0,55	473	464	476	474	457	431	405	453
0,60	487	482	490	489	466	440	424	484
0,65	500	496	503	501	473	448	442	507
0,70	512	509	515	513	480	455	461	525
0,75	522	521	525	523	487	462	479	538
0,80	533	532	536	533	494	469	499	550
0,85	543	543	546	543	502	477	519	563
0,90	553	555	558	554	511	486	542	580
0,95	567	571	574	568	523	498	567	608

Для образцов базальтовой изоляции характер изменения степени конверсии от температуры идентичен, что указывает на возможно схожие составы синтетического связующего, применяемого для скрепления волокон.

#### **4.4 Результаты определения энергии активации**

Целью кинетического анализа является определение значений энергии активации, а также предэкспоненциального множителя для разных степеней конверсии.

Расчет энергии активации в зависимости от степени конверсии проводился в программе Thermokinetics 3 NETZSCH методом Озавы-Флинна-Уолла и методом Фридмана.

Результаты расчета энергии активации, предэкспоненциального множителя, а также отклонение энергии активации методом Озавы-Флинна-Уолла и методом Фридмана представлены в приложении 6.

На рисунках 4.6-4.8 показана зависимость энергии активации от степени конверсии для образцов Форвард, Экоролл, BOS100 (для исследуемых образцов других производителей в приложении 7).

Из результатов кинетического анализа можно узнать зависит ли эффективная энергия активации от конверсии. Если энергия активации не демонстрирует каких-либо существенных изменений с  $\alpha$ , процесс может быть описан одной эффективной энергией активации. Это не обязательно означает, что рассматриваемый процесс является одноэтапным. Скорее всего, это многошаговый процесс, имеющий один шаг, скорость которого определяет общую скорость процесса. Возможно также, что доминирующие в общей кинетике стадии имеют незначительно различающиеся энергии активации [95, 101].

Для базальтовой изоляции характерно не существенное изменение энергии активации при различных степенях конверсии, примеры представлены на рисунках 4.6-4.8.



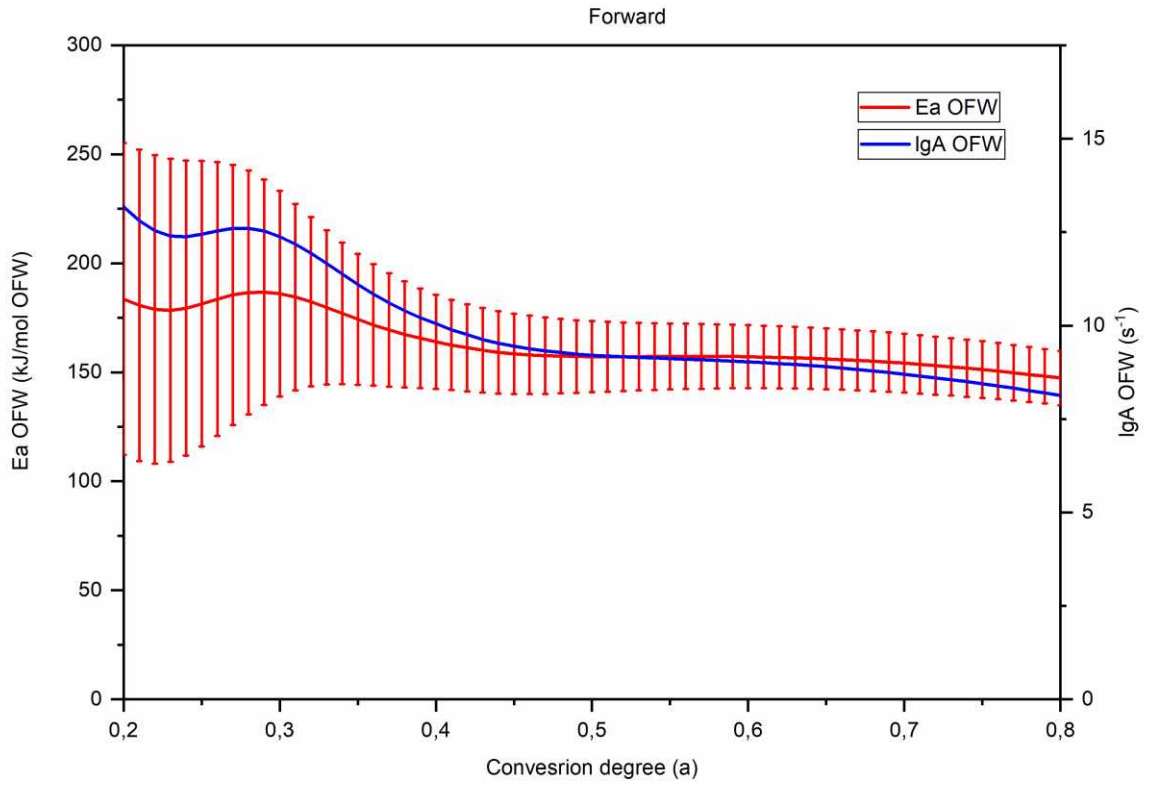


Рис. 4.6 Энергия активации при различных степенях конверсии изоляции Форвард

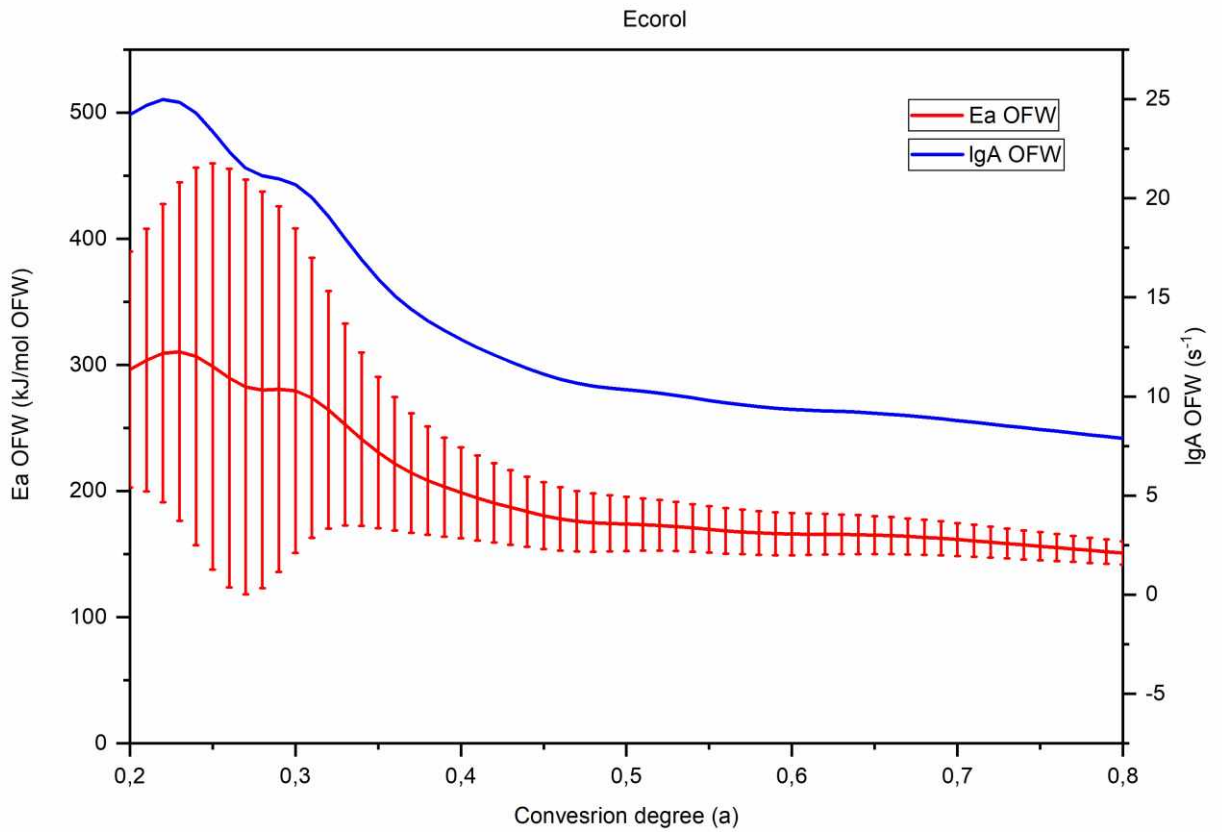


Рис. 4.7 Энергия активации при различных степенях конверсии изоляции Экоролл

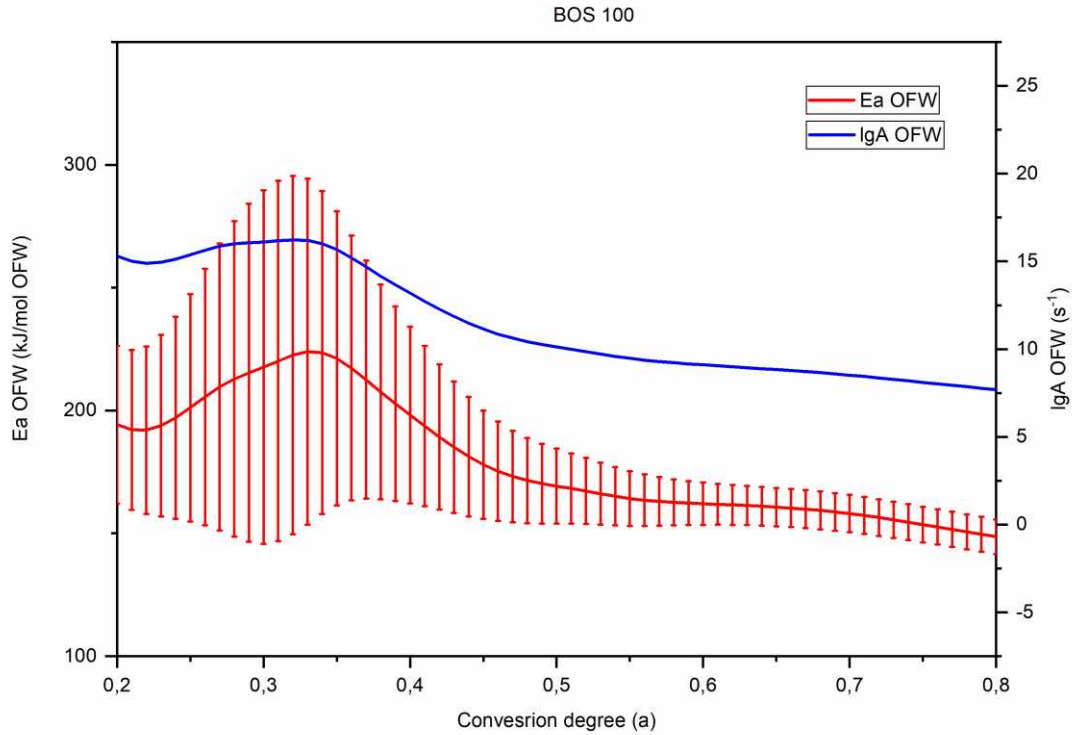


Рис. 4.8 Энергия активации при различных степенях конверсии изоляции BOS 100

Если эффективная энергия активации не изменяется существенно в зависимости от  $\alpha$ , процесс может быть адекватно описан как одноступенчатая кинетика [101].

Для образцов базальтовой тепловой изоляции была рассчитана одна эффективная энергия активации, описывающая весь процесс разложения полимерного связующего.

Эффективная энергия активации определялась по формуле [103]:

$$E_{\alpha} = \frac{E_1 k_1(T)(1 - \alpha_1) + E_2 k_2(T)(1 - \alpha_2)}{k_1(T)(1 - \alpha_1) + k_2(T)(1 - \alpha_2)}. \quad (4.8)$$

Результаты расчета эффективной энергии активации для базальтовой изоляции представлены в таблице 4.4

Таблица 4.4 Эффективная энергия активации для волокнистой базальтовой тепловой изоляции

Материал	$E_a$ , Дж/моль (Озавы-Флинна-Уолла)	$E_a$ , Дж/моль (Фридман)
BOS 80	169867	135853
BOS 100	175931	147787
BOS 120	140463	134578
Экорол	177711	147557
Форвард	159409	143050
Rockwool	143489	113048
Урса	131587	106226

Зависимость энергии активации от степени конверсии для изоляции Pyrogel XTE представлена на рисунке 4.9.

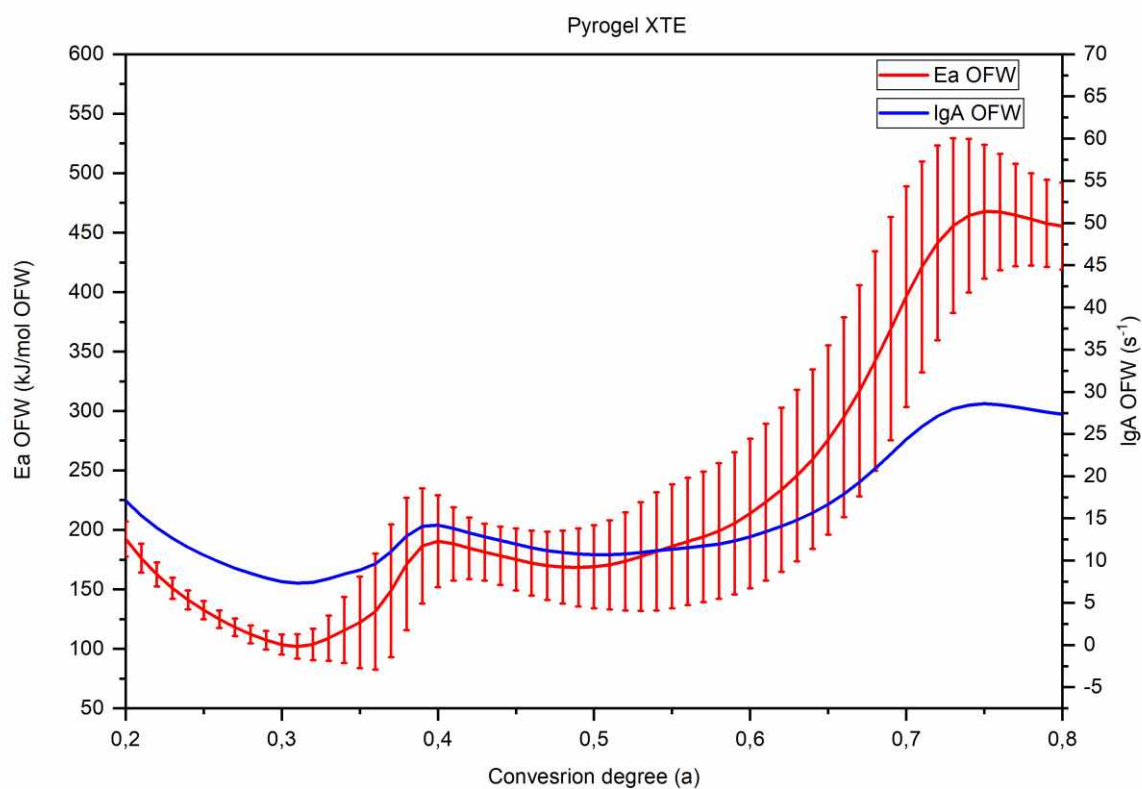


Рис. 4.9 Энергия активации при различных степенях конверсии изоляции Pyrogel XTE

Когда обнаруживается, что  $E_a$  значительно зависит от  $\alpha$ , процесс, вероятно, включает две или более стадий, имеющих разные энергии активации. При этом одностадийное уравнение скорости не может быть применено для описания кинетики процесса во всем диапазоне экспериментальных конверсий и температур. Тем не менее, возникновение многоступенчатого процесса не следует воспринимать как немедленное нарушение изоконверсионного принципа, несмотря на то что последний выполняется строго для одностадийного процесса. Этот принцип по-прежнему работает как удовлетворительное приближение, поскольку изоконверсионные методы описывают кинетику процесса с помощью нескольких одноступенчатых кинетических уравнений, каждое из которых представляет только одну степень превращения и с вязанный с ним узкий диапазон температур [101].

На основании вышеизложенного эффективная энергия активации для изоляции Pyrogel XTE определялась для двух этапов разложения. Первый этап в диапазоне температур 150-296 °С характерных для первого резкого пика на ДТГ кривой (см. рис. 4.3) при температуре 243-266 °С. Второй этап в диапазоне температур 491-629 °С характерных для второго пика на ДТГ кривой (см. рис. 4.3) при температуре 532-553 °С. Результаты в таблице 4.5.

В литературе [106] отмечается, что второй этап может быть вызван разложением –  $\text{CH}_3$  группы и группы  $\text{SiOH}$ .

Первый этап, соответствующий пику на ДТГ кривых при температурах 243-266 °С, может быть вызван разложением некоторых органических видов, не связанных непосредственно со структурой кремнезема [106].

Таблица 4.5 Эффективная энергия активации для изоляции Pyrogel XTE

	$E_a$ , Дж/моль (Озавы-Флинна-Уолла)	$E_a$ , Дж/моль (Фридман)
Этап 1	140748	101668
Этап 2	413511	456283

#### 4.5 Результаты расчета термической устойчивости и термического индекса

Результаты расчета термического индекса, т.е. предельной температуры эксплуатации при заданном сроке 20 лет для базальтовой тепловой изоляции с полимерным связующим представлены в таблице 4.6. Для волокнистых теплоизоляционных материалов с полимерным связующим в качестве предельно допустимого ухудшения свойств предлагается рассматривать полное разложение полимерного связующего.

Таблица 4.6 Термический индекс (ТИ) базальтовой изоляции с полимерным связующим

Материал	ТИ, °С (за эффективную энергию активации принята рассчитанная по методу Озавы-Флинна-Уолла)	ТИ, °С (за эффективную энергию активации принята рассчитанная 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
Урса	194±24	150±17

Для обеспечения стабильности теплозащитных свойств волокнистых изоляционных материалов с полимерными связующими материал не должен подвергаться воздействию температур выше, чем приведенные в таблице 4.6, предельные температуры применения.

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 4.7.

Таблица 4.7 Термический индекс (ТИ) изоляции Pyrogel XTE

Степень конверсии	ТИ, °С (за эффективную энергию активации принята рассчитанная по методу Озавы-Флинна-Уолла)	ТИ, °С (за эффективную энергию активации принята рассчитанная по методу Фридмана)
0,6 (начало этапа 2)	331±33	337±32
0,9	394±35	403±33

На рисунках 4.10-4.11 представлен прогноз термической деструкции полимерного связующего (для теплоизоляционного материала BOS100) при температуре 450 °С, выполненный по ГОСТ Р 57946-2017 (АСТМ Е1877) в сравнении с фактически измеренными данными, полученными из результатов изотермической термогравиметрии. На рисунке 4.12 – при температуре 350 °С.

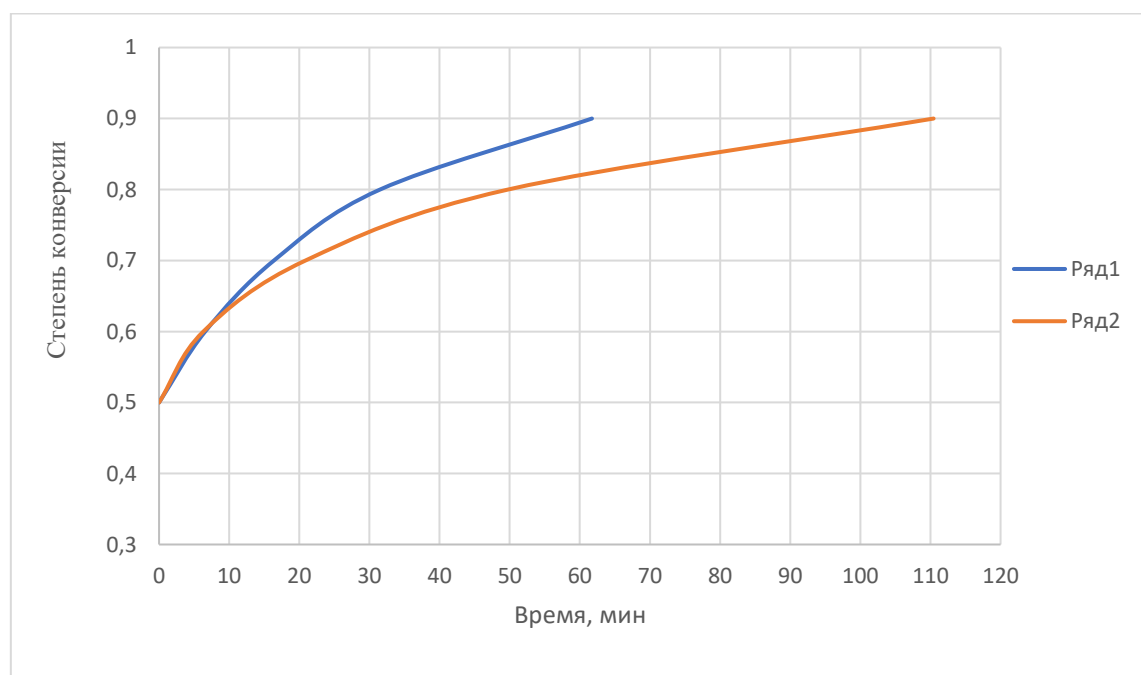


Рис. 4.10 Прогноз термической деструкции полимерного связующего при температуре 450 °С: ряд 1 – фактические данные из результатов изотермической термогравиметрии; ряд 2 – прогноз по ГОСТ Р 57946-2017, энергия активации определена по методу Озавы-Флинна-Уолла (таблица 4.5)

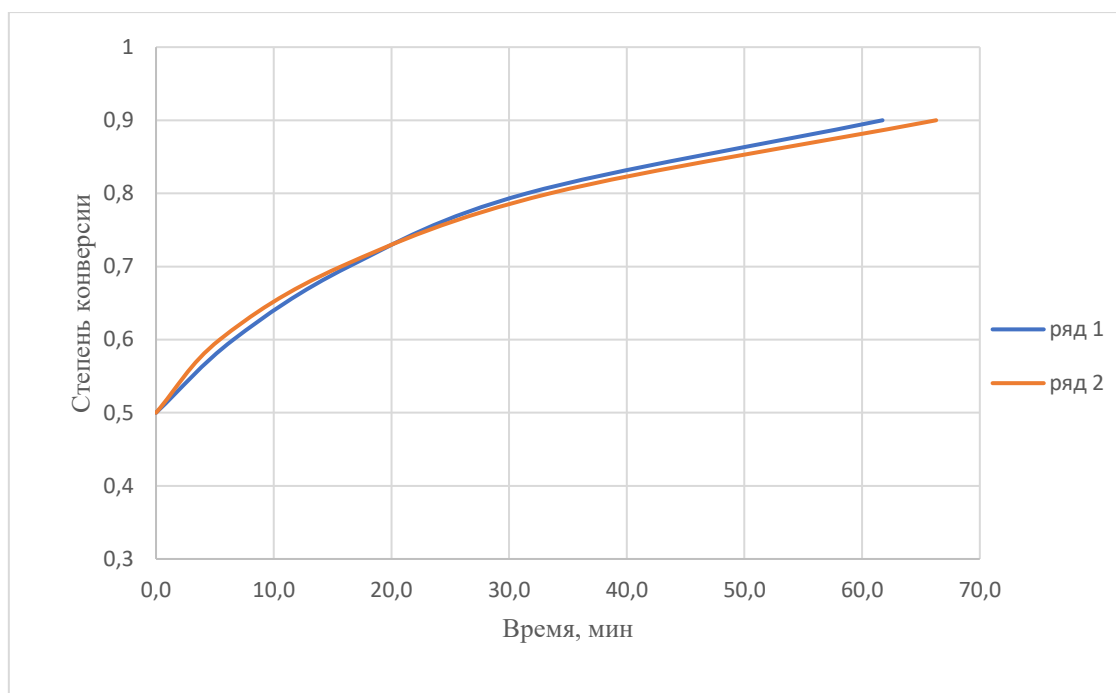
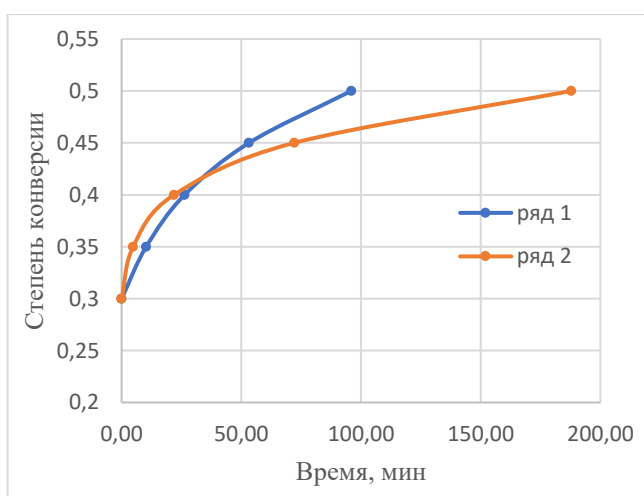
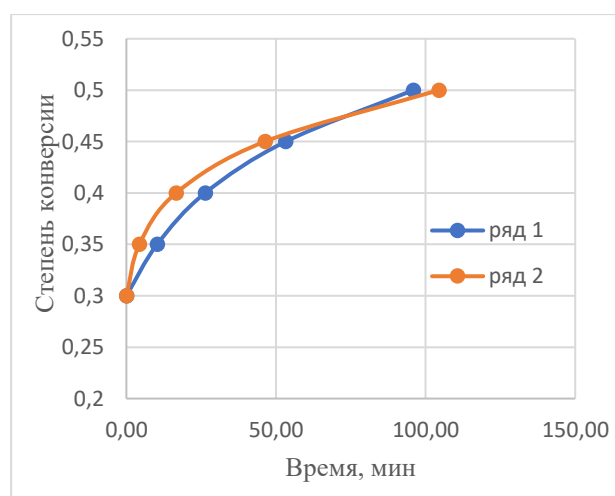


Рис. 4.11 Прогноз термической деструкции полимерного связующего при температуре 450 °С: ряд 1 – фактические данные из результатов изотермической термогравиметрии; ряд 2 – прогноз по ГОСТ Р 57946-2017, энергия активации определена по методу Фридмана (таблица 4.5)



а)



б)

Рис. 4.12 Прогноз термической деструкции полимерного связующего при температуре 350 °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

Из рисунков 4.10-4.12 видно, что прогноз термической деструкции полимерного связующего по ГОСТ Р 57946-2017, при определении энергии активации по методу Фридмана более сопоставим с фактическими результатами (полученными при воздействии на материал постоянной температуры).

Результаты расчета термической устойчивости (время до полного разложения полимерного связующего) по ГОСТ Р 57946-2017 приведены в приложении 8 (энергия активации определена по методу Фридмана).

Кривые термической устойчивости для материалов BOS100 и Экоролл в зависимости от температуры воздействия на материал представлены на рисунке 4.13.

На рисунке 4.13 видно, что требуемый срок службы в 20 лет обеспечивается эксплуатацией материала до температур 218-219 °С.

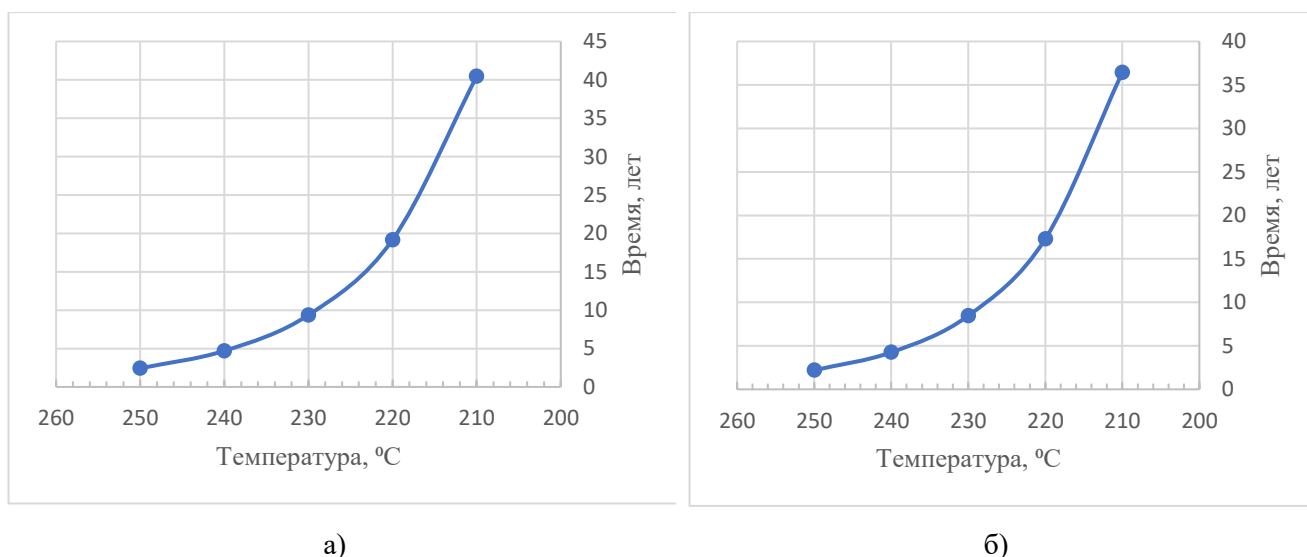


Рис. 4.13 Кривые термической устойчивости в зависимости от температуры воздействия на материал, рассчитанные по ГОСТ Р 57946-2017: а) BOS 100; б) Экоролл

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 4.14



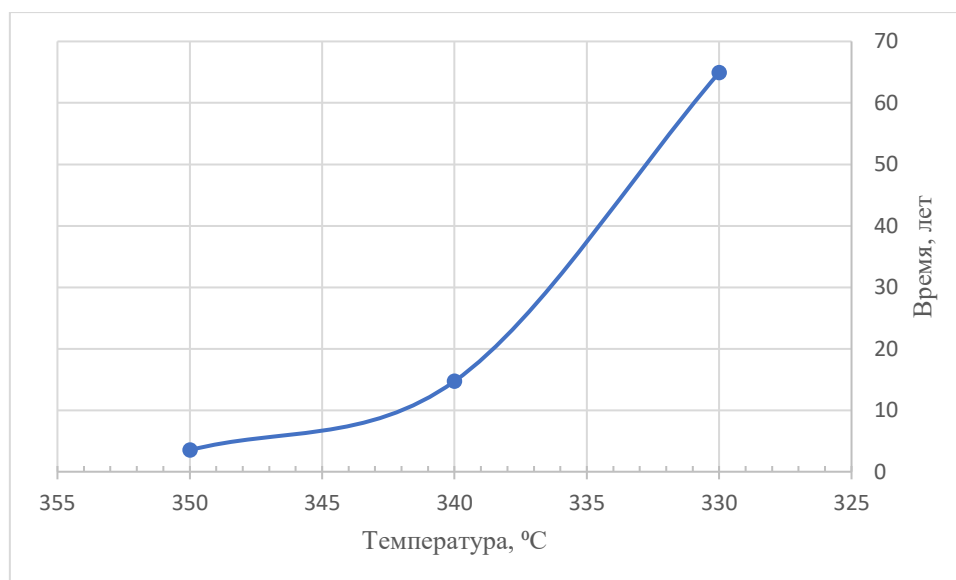


Рис. 4.14 Кривая термической устойчивости в зависимости от температуры воздействия на материал для изоляции Pyrogel XTE

Точность полученных прогнозов экспоненциально зависит от неопределенности используемого значения энергии активации.

Рассмотренная методика использовалась для разработки программного продукта по расчету срока службы и предельной температуры применения теплоизоляционных материалов (органических, а также с содержанием органических связующих) из данных термогравиметрии разложения (Приложение 9) [107, 108].

#### 4.6 Выводы по главе

1. На основании результатов термогравиметрического анализа 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.

2. Образцы БСТВ демонстрируют наименьшие потери массы, менее 1 %, что можно объяснить отсутствием связующих в материале.

3. Для рассмотренных образцов волокнистых теплоизоляционных материалов с полимерным связующим для обеспечения срока службы в 20 лет (без выгорания связующего) температура воздействия на материал не должна превышать 150-250 °С (в зависимости от используемого материала).

3. Рассчитано время жизни материала в зависимости от температуры воздействия.

4. Полученные по рассмотренной методике значения времени жизни могут учитываться на этапе выбора теплоизоляционных материалов для оценки соответствия долговечности изоляционного материала предъявляемым требованиям к долговечности теплоизоляционной конструкции.

## **5 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА ВАРИАНТОВ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

### **5.1 Методика оценки финансово-экономической эффективности от организации нормативной тепловой защиты трубопроводов. Сравнительная экономическая оценка теплоизоляционных материалов**

Для промышленного предприятия основной целью применения теплоизоляционных конструкций является в конечном счете экономия топлива, в случае выработки энергоносителей на собственном источнике, либо в случае покупки у стороннего централизованного источника – снижение затрат на покупку тепло и энергоносителей.

Эффект от устройства теплоизоляционной конструкции должен компенсировать затраты, связанные с выполнением и эксплуатацией этих конструкций.

В настоящее время для изоляции высокотемпературных объектов на рынке представлены теплоизоляционные материалы различных производителей, различающиеся ценой, коэффициентом теплопроводности, прочностью, сжимаемостью, предельной температурой применения, долговечностью при эксплуатации в условиях высоких температур.

Экономическая эффективность теплозащиты объекта существенно зависит от выбранного теплоизоляционного материала [109].

При проектировании теплоизоляционных конструкций трубопроводов по нормируемой плотности теплового потока необходимо сравнивать не только коэффициенты теплопроводности материала, т.к. можно подобрать такие толщины материалов, обеспечивающие одинаковый теплозащитный эффект, но также учитывать стоимость погонного метра конструкции, а также долговечность материала в условиях эксплуатации, так как это непосредственно влияет на количество капитальных ремонтов, требующих замены теплоизоляционного материала.

На этапе проектирования теплоизоляционных конструкций для достижения наибольшей экономической эффективности от организованной теплозащиты выбор теплоизоляционного материала необходимо осуществлять с учетом перечисленных выше параметров.

В настоящее время существует несколько методик позволяющих оценить результирующую экономическую эффективность от организации теплозащиты объекта, а также провести сравнительную экономическую оценку при выборе теплоизоляционного материала.

При инвестициях в мероприятия по энергосбережению, сравнение различных вариантов инвестиционного проекта рекомендуется [110, 111, 112] производить с использованием следующих показателей:

- чистый дисконтированный доход (ЧДД) или интегральный эффект;
- индексы доходности;
- внутренняя норма доходности (ВНД);
- срок окупаемости;
- другие показатели, отражающие специфику проекта.

Помимо общепринятых показателей для финансово-экономической оценки эффективности инвестиционных проектов, сравнение различных изоляционных материалов можно осуществлять, используя критерии экономической оценки потенциальной эффективности теплоизоляционных материалов, описанные в работах [109, 113, 114, 115].

### 5.1.1 Чистый дисконтированный доход

ЧДД выражает разницу между суммой текущих эффектов за весь расчетный период, приведенной к начальному шагу, и приведенной к тому же моменту времени величиной капитальных вложений (инвестиций).

При разовой (одномоментной) инвестиции ЧДД рассчитывается по формуле

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T \frac{R_t - Z_t}{(1 + E)^t} - K, \quad (5.1)$$

где  $T$  – горизонт расчета, лет;  $R_t$  – результат от инвестиций в году  $t$ , руб.;  $Z_t$  – текущие затраты в году  $t$  при условии, что в них не входят инвестиции, руб.;  $E$  – норма дисконта;  $K$  – сумма разовых инвестиций, руб.;  $R_t - Z_t$  – эффект, достигаемый за год.

Если проект предполагает не разовую инвестицию, а последовательное инвестирование финансовых ресурсов в течение нескольких лет, то ЧДД рассчитывается по формуле

$$\text{ЧДД} = \sum_{t=0}^T \frac{R_t - Z_t}{(1 + E)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{K_t}{(1 + E)^t}, \quad (5.2)$$

где  $K_t$  – капиталовложения на  $t$ -ом году.

Приведение к базисному моменту времени затрат, результатов и эффектов, имеющих место на  $t$ -ом шаге расчета, производится путем их умножения на коэффициент дисконтирования  $\alpha_t$  определяемый для постоянной нормы дисконта  $E$  как:

$$\alpha_t = \frac{1}{(1 + E)^t} \quad (5.3)$$

### 5.1.2 Индекс доходности дисконтированных инвестиций (ИДД)

Отношение суммы дисконтированных доходов к абсолютной величине дисконтированной суммы капиталовложений при реализации проекта, рассчитывается по формулам 5.4-5.5.

При одномоментных инвестициях:

$$\text{ИДД} = \sum_{t=0}^T \frac{R_t - Z_t}{(1 + E)^t} / K, \quad (5.4)$$

если инвестиции осуществляются в течении ряда лет:

$$\text{ИДД} = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{R_t - Z_t}{(1 + E)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{K_t}{(1 + E)^t}} \quad (5.5)$$

Используется для сравнения проектов со схожими показателями ЧДД.

### 5.1.3 Критерии сравнительной экономической оценки потенциальной эффективности теплоизоляционных материалов

В работах [109, 114, 115] отмечается наиболее простой способ сравнительной оценки различных теплоизоляционных материалов – сопоставление произведений  $S_M \lambda_M$  (цены кубического метра изоляционного материала и его коэффициента теплопроводности) [109, 115], либо сопоставление произведений стоимости одного погонного метра изоляционной конструкции на коэффициент теплопроводности материала (в этом случае учитываются толщины изоляционного слоя) [114]. В работе [109] данный критерий  $S_M \lambda_M$  рассматривается как комплексный показатель эффективности теплоизоляционных материалов первого рода. Данный критерий может использоваться для сопоставления различных теплоизоляционных материалов, имеющих одинаковый нормативный срок службы. Изоляционная конструкция, у которой это произведение будет наименьшим, принимается как наиболее экономичная. В территориальных строительных нормах Саратовской области и Республики Башкортостан содержится методика выбора теплоизоляционных материалов, основанная на использовании данного произведения  $S_M \lambda_M$  [116, 117].

В работе [109] был предложен дифференциальный критерий потребительской эффективности теплоизоляционных материалов  $\sigma_T$ :

$$\sigma_T = \frac{c_3}{c_T \cdot \lambda_T} \cdot 10^6, \quad (5.6)$$

где  $c_T$  – стоимость теплоизоляционного материала, руб/м<sup>3</sup>;  $\lambda_T$  – коэффициент теплопроводности материала, Вт/м·°С;  $c_3$  – стоимость тепловой энергии, руб/Вт·ч;  $\sigma_0$  – постоянный множитель, равный  $10^6$ , Вт<sup>2</sup>·ч/м<sup>4</sup>·°С.

Представляющий собой безразмерный параметр, численно равный отношению элементарного теплозащитного эффекта (сокращение стоимости потерянной теплоты) при некоторых выбранных стандартных условиях к элементарным капитальным вложениям в этот слой [109]. Данный критерий рассматривается, как комплексный критерий эффективности теплоизоляционных материалов второго рода.

Существенным недостатком вышеупомянутых комплексных критериев, как указано в работе [109], является то, что ни один из них не учитывает долговечности материала.

Для учета долговечности предлагается [109] комплексный критерий третьего рода –  $p_T$  (полный потребительский потенциал теплоизоляционного материала), представляющий собой отношение дисконтированной в течение всего срока службы материала прибыли от устройства элементарного теплозащитного слоя к капитальным вложениям в этот слой при стандартных условиях сопоставления.

Преобразовав выражение для определения индекса доходности инвестиций (5.4) под условия организации теплозащиты объекта, с расчётом коэффициента дисконтирования прибыли за срок службы теплоизоляционного материала, автор [109] получил следующее выражение:

$$p_T = 0,125 \cdot \alpha \cdot \frac{c_3}{c_T \cdot \lambda_T} = 0,125 \cdot \alpha \cdot \sigma_T, \quad (5.7)$$

где  $\alpha$  – коэффициент дисконтирования прибыли, лет, равный сумме дисконтирующих множителей за весь срок службы материала.

В случае если срок службы материала меньше срока службы объекта учитывается дисконтирование капитальных вложений, связанных с заменой теплоизоляционного материала, а эффект от теплозащиты рассчитывается на весь срок службы изолируемого объекта. В данном случае вводится понятие «частный потребительский потенциал теплоизоляционного материала», определяемый по следующему выражению:

$$p_{\tau}^* = p_{\tau} \frac{\alpha^*}{\alpha \cdot \beta}, \quad (5.8)$$

где  $\alpha^*$  – коэффициент дисконтирования эффекта от теплозащиты, лет, рассчитанный на срок службы изолируемого объекта;  $\beta$  – коэффициент дисконтирования дополнительных капитальных вложений, при замене изоляции.

Так как частный потребительский потенциал связан с индексом доходности инвестиций, то соответственно наибольшие значения  $p_{\tau}^*$  способны обеспечивать наибольшие индексы доходности и при нормативной и при оптимальной теплозащите плоских поверхностей [115].

Сравнение частных потребительских потенциалов лежит в основе методики сопоставления и выбора теплоизоляционных материалов, предложенной автором [115].

Но при организации тепловой защиты трубопроводов, значительное влияние оказывает кривизна изолируемых поверхностей, поэтому автор [115] адаптирует выражение (5.8) к условиям теплозащиты трубопроводов введением поправочного коэффициента на цилиндрическую форму:

$$m_{\text{тр}} = (\alpha_{\text{н}} \cdot R_{0,\text{ст}})^2 \cdot \frac{1}{Bi} \cdot (Bi - 1), \quad (5.9)$$

где  $\alpha_{\text{н}}$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности теплоизоляционного слоя, Вт/м<sup>2</sup>·°С, расчетное значение определяемое для каждого конкретного случая;  $R_{0,\text{ст}}$  – термическое сопротивление стандартной плоской стенки равное 1,0 м<sup>2</sup>·°С/Вт;  $Bi$  – модифицированный критерий Био, зависящий от диаметра трубопровода, коэффициента теплоотдачи с поверхности трубопровода и от коэффициента теплопроводности материала.

Использование предложенных [109] комплексных критериев первого второго и третьего рода в случае выбора теплоизоляционного материала для плоской поверхности упрощает оценку потенциального экономического эффекта при использовании выбираемых материалов.



Однако при организации тепловой защиты трубопроводов, методика, предложенная автором [115] значительно усложняется в расчетах из-за необходимости учета влияния диаметра трубопроводов на снижение доходности инвестиций.

## **5.2 Выбор материала, обеспечивающего наибольший экономический эффект при организации тепловой защиты паропроводов**

Влияние теплопроводности, долговечности и стоимости материала на экономическую эффективность организованной теплозащиты рассмотрим на примере паропровода надземной прокладки, транспортирующего пар с температурой 400 °С [118]. Продолжительность эксплуатации паропровода, принималась круглогодичной. Среднегодовая температура наружного воздуха для города Нижнекамск – 4 °С. Срок службы паропровода принимался в соответствии с [119] 20 лет. Толщина теплоизоляционного слоя  $\delta$ , м, определялась по нормируемой плотности теплового потока в соответствии с методикой СНИП-41-03-2003 (результаты в таблице 5.1). Для уплотняемых материалов (БСТВ-30, БСТВ-60) расход теплоизоляционного материала на 1 п.м трубопровода рассчитывался с учетом коэффициента уплотнения  $K_c$ , определяемого по рекомендациям СНИП-41-03-2003. Нормируемая удельная линейная плотность теплового потока,  $q_l^n$ , Вт/м, в зависимости от диаметра паропровода и температуры пара определялась по [26]. Стоимость теплоизоляционной конструкции,  $S_o$ , руб/п.м., рассчитывалась на 1 п.м паропровода исходя из необходимой толщины материала, стоимости теплоизоляционного материала и стоимости покрывного материала. В качестве покрывного материала для всех вариантов были приняты оболочки из нержавеющей стали толщиной 0,80 мм. Цены на теплоизоляционные и покрывной материалы определялась из источников в сети Интернет [120-122]. Ожидаемая ежегодная экономия (эффект) от организации нормативной тепловой защиты паропровода определялась в сравнении с неизолированным паропроводом. Норма дисконта принималась 15%. Амортизация – 5% годовых от капитальных затрат. Годовые отчисления на ремонт и обслуживание изоляции - 6% от

капитальных затрат. Налог на прибыль – 20%. Тарифная стоимость тепловой энергии, отпускаемой в виде пара 1070 руб/Гкал.

Исходя из результатов четвертой главы реальный срок службы волокнистых теплоизоляционных материалов, в которых для скрепления волокон используется полимерное связующее, при эксплуатации в условиях высоких температур не будет соответствовать нормативному сроку службы паропровода, что потребует дополнительных капитальных вложений при замене тепловой изоляции.

Результаты расчета показателей для оценки экономической эффективности от организации нормативной тепловой защиты паропровода, выполненной из различных теплоизоляционных материалов представлены в таблице 5.1.

Рассматриваемые теплоизоляционные материалы: 1 – базальтовые теплоизоляционные цилиндры BOS 100; 2 – базальтовые 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.

При расчете показателей для финансово-экономической оценки эффективности организованной теплозащиты, длина рассматриваемого периода принималась равной нормативному сроку службы эксплуатируемого трубопровода.

Таблица 5.1 Результаты расчета показателей для оценки экономической эффективности от организации нормативной тепловой защиты паропровода

Параметры	Материалы				
	BOS 100	BOS 120	Evergel	Pyshield Pro	БСТВ 30
$\lambda$ , Вт/м·°С	0,0697	0,0637	0,0268	0,029	0,0935
Срок службы материала, лет	10	10	>20	>20	>20
Цена материала руб/м <sup>2</sup>	*	*	3529**	3562***	-
Цена материала руб/м <sup>3</sup>			-	-	5700
Диаметр 159 мм					
Эффект, руб/м год	78304				

## Продолжение таблицы 5.1

$q_l^H$ , Вт/м	182				
$\delta$ , м	0,123	0,108	0,034	0,038	0,200
$S_0$ , руб/п.м.	7929	8676	7676	9932	8862
ЧДД, руб/м	438569	437405	441145	438272	439635
ИДД	43	39	57	44	50
Диаметр 273 мм					
Эффект, руб/м год	124863				
$q_l^H$ , Вт/м	236				
$\delta$ , м	0,145	0,128	0,044	0,048	0,224
$S_0$ , руб/п.м.	14501	16282	15355	19789	12641
ЧДД, руб/м	695936	693668	699477	693830	702933
ИДД	37	33	46	35	56
Диаметр 325 мм					
Эффект, руб/м год	145308				
$q_l^H$ , Вт/м	259				
$\delta$ , м	0,152	0,135	0,047	0,051	0,232
$S_0$ , руб/п.м.	15222	15984	18518	23146	14337
ЧДД, руб/м	813055	811868	813184	807291	818509
ИДД	42	40	44	35	57
Диаметр 426 мм					
Эффект, руб/м год	184085				
$q_l^H$ , Вт/м	301				
$\delta$ , м	0,163	0,145	0,052	0,057	0,243
$S_0$ , руб/п.м.	19071	23427	24675	35195	17436
ЧДД, руб/м	1030360	1023574	1028644	1015247	1037864
ИДД	42	34	42	29	60

Примечание: \* – цена за теплоизоляционные цилиндры представляется производителем за 1 погонный метр в зависимости от внутреннего диаметра цилиндра и толщины слоя, для материала BOS100 для изолируемого трубопровода диаметром 159 мм – 4256 руб/пм, 273 мм – 9392 руб/пм, 325 мм – 9575 руб/пм, 426 мм – 12347 руб/пм, для материала BOS120 для изолируемого трубопровода диаметром 159 мм – 5183 руб/пм, 273 мм – 11443 руб/пм, 325 мм – 10516 руб/пм, 426 – 16882 руб/пм; \*\* – цена материала Evergel за квадратный метр толщиной 13 мм; \*\*\* – цена материала Pyshield Pro за квадратный метр толщиной 10 мм.

В работе [115] показано, что главным критерием выбора наиболее экономичного теплоизоляционного материала при устройстве нормативной теплозащиты трубопроводов должен быть индекс доходности инвестиций.

Увеличение диаметра трубопровода оказывает влияние на изменение индекса доходности организованной теплозащиты.

Изменение индекса доходности инвестиций при организации нормативной теплозащиты рассмотренного паропровода, выполненной из различных теплоизоляционных материалов, в зависимости от увеличения диаметра отображено на рисунке 5.1.

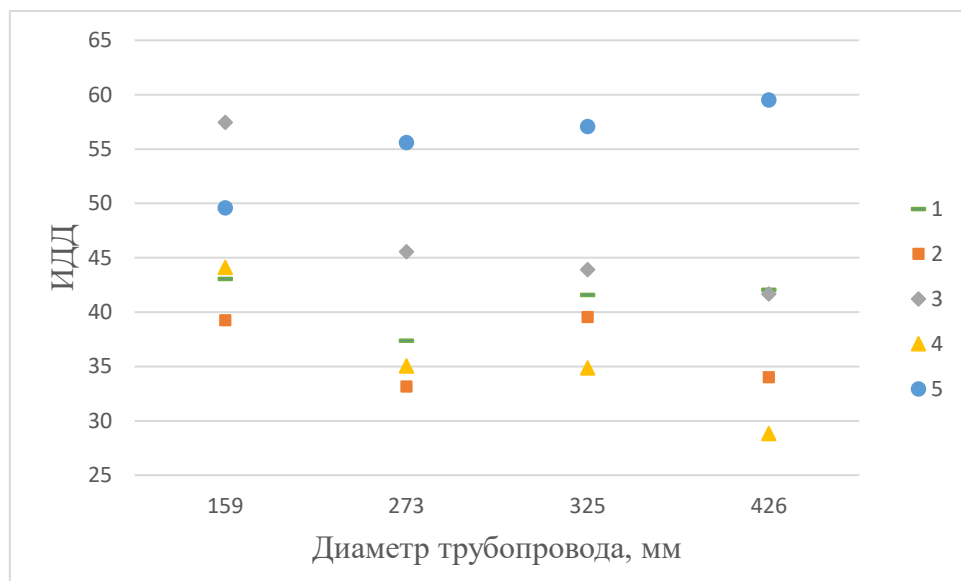


Рис. 5.1 Изменение индекса доходности инвестиций при организации нормативной теплозащиты паропровода в зависимости от увеличения диаметра, 1 – базальтовые теплоизоляционные цилиндры BOS 100; 2 – базальтовые теплоизоляционные цилиндры BOS 120; 3 – мат аэрогелевый на основе стеклохолста Evergel; 4 – аэрогелевое полотно на основе стеклохолста Pyshield Pro; 5 – базальтовое супертонкое волокно БСТВ 30

Анализируя графики на рис. 5.1. и результаты, представленные в таблице 5.1 видно, что в данном случае для паропровода диаметром 159 мм экономически целесообразным является выбор материала №3 (Evergel) несмотря на то, что данный материал в сравнении цен за один кубический метр является самым дорогим (271461 руб/м<sup>3</sup>). Высокая стоимость кубического метра данного материала во многом обусловлена отсутствием производства материала в

Российской Федерации. Выбор материала №3 для данного паропровода способен обеспечить наибольший индекс доходности инвестиций 57 по сравнению с другими рассматриваемыми материалами (в 1,5 раз выше, чем при выборе материала №2). Разница между чистым дисконтированным доходом при использовании материала №3 по сравнению с материалом №2 составляет 3740 руб/м. В случае использования для трубопровода диаметром 273 мм близких по стоимости за погонный метр теплоизоляционной конструкции материалов №2 и №3 разница между чистым дисконтированным доходом составит 5809 руб/м. Для диаметров от 273 мм в рассмотренном случае сравнительная экономическая оценка показывает преимущества материала №5 (БСТВ 30). Однако следует учитывать, что при использовании данного материала толщина теплоизоляционного слоя получается наибольшей. Кроме того, необходимо также учитывать высокий коэффициент уплотнения материала. В тех случаях, когда получаемая толщина теплоизоляционного слоя удовлетворяет техническим требованиям заказчика, выбор данного материала является оптимальным.

Влияние долговечности материала на изменение индекса доходности инвестиций в нормативную теплозащиту паропровода рассмотрим (рис. 5.2) на примере двух изоляционных материалов: 1 – базальтовые теплоизоляционные цилиндры BOS 100; 2 – мат аэрогелевый на основе стеклохолста Evergel.

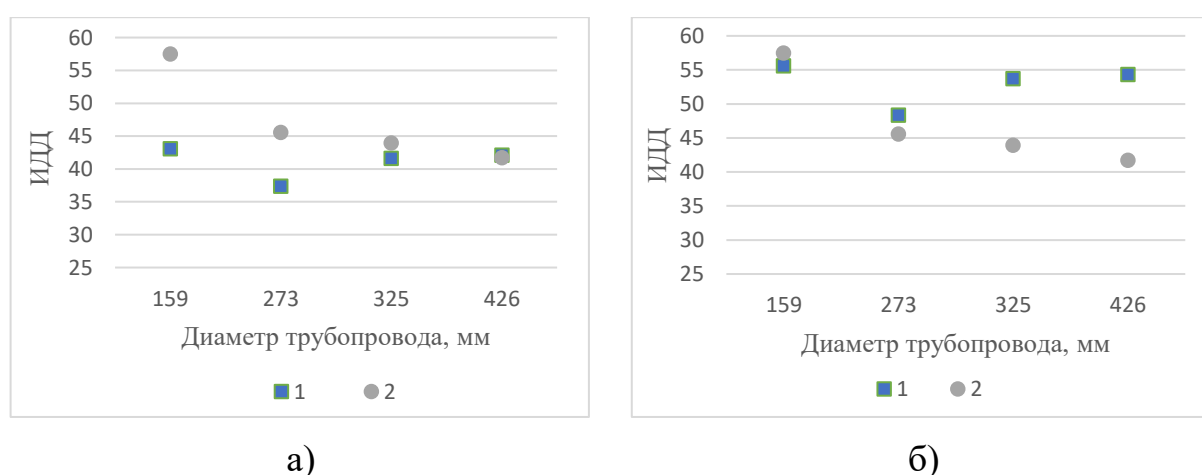


Рис. 5.2 Изменение индекса доходности инвестиций в нормативную теплозащиту: а) с учётом необходимости замены материала, содержащего полимерное связующее; б) без учёта необходимости замены материала, содержащего полимерное связующее. 1 – базальтовые теплоизоляционные цилиндры BOS 100; 2 – мат аэрогелевый на основе стеклохолста Evergel.

Как видно из графиков, долговечность теплоизоляционного материала оказывает непосредственное влияние на результаты финансово-экономической оценки эффективности инвестиций в организацию теплозащиты трубопроводов при транспортировке теплоносителей.

В параграфе 1.4 были представлены результаты оценки тепловых потерь при транспортировке пара до группы заводов предприятия шинной промышленности (участки со сверхнормативными потерями представлены в таблице 1.4).

В случае замены теплоизоляционных конструкций на выделенных участках для выбора наиболее экономичного теплоизоляционного материала при организации нормативной тепловой защиты паропроводов, необходимо проведение сравнительной экономической оценки различных изоляционных материалов, с учетом теплопроводности, стоимости, а также их долговечности. Результаты сравнительной экономической оценки представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 Результаты расчета показателей для оценки экономической эффективности от организации нормативной тепловой защиты на участках со сверхнормативными потерями для сети пароснабжения группы заводов предприятия рассмотренного в главе 1

диаметр паропровода, мм	длина участка, м	материал						
		BOS 100	BOS 100*	BOS 120	BOS 120*	Evergel	Pyshield Pro	БСТВ 30
		ЧДД (тыс.руб) / ИДД						
109	230	45 870 / 31	46 198 / 40	45 686 / 28	46 048 / 36	<b>46 129 / 38</b>	46 029 / 36	46 037 / 36
219	1270	451 918 / 32	455 015 / 42	453 009 / 35	455 906 / 45	452 071 / 34	447 467 / 27	<b>456 064 / 45</b>
273	720	307 854 / 31	310 022 / 41	308 431 / 33	310 493 / 43	306 180 / 29	302 652 / 23	<b>311 195 / 46</b>
325	1165	577 394 / 32	581 349 / 42	576 601 / 31	580 701 / 40	572 415 / 27	564 728 / 21	<b>583 263 / 47</b>

Примечания: \* – результаты без учёта реальной долговечности и необходимости капитального ремонта для материалов с полимерным связующим. Наилучшие значения показателей выделены.

Влияние долговечности материала на экономическую эффективность от нормативной теплозащиты для рассматриваемых объектов можно увидеть из результатов расчёта ЧДД с учётом и без учета необходимости замены материалов с полимерным связующим (BOS 100, BOS 120). Для рассматриваемого объекта с суммарной протяженностью участков со сверхнормативными потерями, рекомендованных к замене 3385 м, разница в ЧДД, если учитывать реальную долговечность материала составляет для BOS 100 – 9,5 млн. рублей, BOS 120 – 9,4 млн. рублей.

Так как в случае организации нормативной теплозащиты эффект будет одинаков для всех конкурирующих материалов (т.к. определяется величиной нормативных тепловых потерь), то разница в ЧДД обусловлена величиной дисконтированных капитальных вложений в теплоизоляционную конструкцию при выборе того или иного материала.

Для рассматриваемых участков результаты выбора наиболее экономичного теплоизоляционного материала (по величине индекса доходности) представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 Выбор наиболее экономичного теплоизоляционного материала для рассматриваемых участков

Диаметр паропровода, мм	Длина участка, м	Вариант №1. Выбор материала с учетом долговечности	Вариант №2. Выбор материала без учёта долговечности
109	230	Evergel	BOS 100
219	1270	БСТВ 30	BOS 120
273	720	БСТВ 30	БСТВ 30
325	1165	БСТВ 30	БСТВ 30

Для рассматриваемого объекта экономия от организации нормативной тепловой защиты при выборе теплоизоляционного материала с учетом его долговечности (вариант №1) составит 3314 тыс. рублей (по сравнению с реальными значениями ИДД и ЧДД для варианта №2).

Для рассматриваемого случая так же экономически целесообразным при проектировании теплозащиты для трубопроводов малых диаметров (до 219 мм) является выбор материала №3 (Evergel). Выбор данного материала для участков сети пароснабжения с диаметром 109 мм обеспечивает более высокий индекс доходности (на 35% больше, чем при выборе материала BOS 120).

На этапе проектирования теплоизоляционной конструкции сравнительная экономическая оценка различных изоляционных материалов, с учетом теплопроводности, стоимости, а также их долговечности, позволит выбрать материал, способствующий достижению наибольшего экономического эффекта от устройства тепловой защиты трубопроводов.

Учёт реальной предельной температуры применения изоляционных материалов с полимерным связующим обеспечит нормативный уровень теплозащиты на протяжении всего срока эксплуатации, без необходимости замены теплоизоляционного материала.

### **5.3 Выводы по главе**

1. Показано, что экономическая эффективность нормативной теплозащиты трубопроводов зависит от выбранного теплоизоляционного материала.

2. Для достижения наибольшей экономической эффективности при организации нормативной тепловой защиты трубопроводов необходимо на этапе проектирования теплоизоляционных конструкций сравнивать не только коэффициенты теплопроводности выбираемых материалов, но также учитывать стоимость погонного метра конструкции, а также реальную долговечность материала в условиях эксплуатации.

3. Приведены результаты расчета показателей для оценки экономической эффективности от организации нормативной тепловой защиты, выполненной из различных теплоизоляционных материалов, для трубопроводов различных диаметров при транспортировке теплоносителя с температурой 400 °С.

4. Показано, что для трубопроводов с малым диаметром при организации нормативной тепловой защиты наибольшая экономическая эффективность может



достигаться при использовании материалов с минимальной теплопроводностью, несмотря на высокую стоимость таких материалов.

5. На примере транспортировки теплоносителя с температурой 400 °С показано, что в зависимости от совокупности физических, стоимостных и эксплуатационных свойств выбираемого материала можно добиться увеличения индекса доходности инвестиций от организации нормативной теплозащиты в 1,5-2 раза.

6. Показано влияние долговечности материала на изменение индекса доходности инвестиций в нормативную теплозащиту паропровода.

7. Показано, что при организации нормативной тепловой защиты паропроводов, можно добиться повышения экономической эффективности, проводя сравнительную оценку конкурирующих вариантов изоляционных материалов с учётом их долговечности, коэффициента теплопроводности и стоимости погонного метра теплоизоляционной конструкции. Для рассматриваемого объекта величина возможной экономии составила 3,3 млн. рублей.

8. Важно уже на этапе проектирования выбирать изоляционные материалы с учётом их долговечности и изменения коэффициента теплопроводности в процессе эксплуатации, т. к. устранение сверхнормативных тепловых потерь путем замены тепловой изоляции на участках требует дополнительных капитальных вложений (значительных при протяженных сетях пароснабжения). Что с точки зрения срока окупаемости мероприятий по замене теплоизоляционной конструкции на участках со сверхнормативными потерями не позволяет отнести их к быстро окупаемым мероприятиям, но, с другой стороны, требуется устранение сверхнормативных потерь, с точки зрения обеспечения требуемых параметров теплоносителя у потребителя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Республика Татарстан относится к регионам с высокой долей энергоемких отраслей в структуре производства промышленной продукции, 56,2 % приходится на химическую, нефтехимическую, топливную промышленность.

Показано на примере заводов шинного комплекса г. Нижнекамск, что на предприятиях энергоемких отраслей промышленности в больших объемах потребляется тепловая энергия в виде высокотемпературных энергоносителей. Для рассматриваемых заводов шинного комплекса в структуре потребления ТЭР на основное производство 88% приходится на тепловую энергию, причем основная часть – это перегретый пар высокого давления.

Для многих крупных предприятий энергоемких отраслей промышленности, имеющих разветвленную и сложную систему теплоэнергоснабжения, как внутреннюю, так и внешнюю, где в больших объемах потребляются высокотемпературные теплоносители, перспективными являются мероприятия по повышению энергетической эффективности, направленные на снижение тепловых потерь при транспортировке энергоносителей.

Для повышения эффективности систем транспортирования тепловой энергии к проблеме снижения сверхнормативных потерь необходимо подходить комплексно:

1. На этапе проектирования теплоизоляционных конструкций и выбора теплоизоляционных материалов следует учитывать предельную температуру применения, а также долговечность материала при эксплуатации в условиях высоких температур, что обеспечит стабильность теплозащитных свойств на протяжении всего срока эксплуатации.

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.

На основании результатов термогравиметрического анализа 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.

Полученные значения времени жизни материала могут учитываться на этапе выбора теплоизоляционных материалов для оценки соответствия долговечности изоляционного материала предъявляемым требованиям к долговечности теплоизоляционной конструкции.

Необходимо уже на этапе проектирования выбирать изоляционные материалы с учётом их долговечности и изменения коэффициента теплопроводности в процессе эксплуатации. Для рассмотренного объекта, при проведении сравнительной экономической оценки конкурирующих вариантов изоляционных материалов величина возможной экономии от организации нормативной тепловой защиты с учётом указанных свойств составила 3,3 млн. рублей.

2. Для оценки эффективности применяемых теплоизоляционных материалов, необходим контроль за величиной фактических тепловых потерь.

Разработано устройство 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 разработана методика по проведению обследования эксплуатирующихся паропроводов.

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.

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. Устройство для измерения плотности теплового потока описано 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.

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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года. Распоряжение правительства РФ от 09.06.2020 N 1523-р [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/565068231>.
2. Указ Президента Российской Федерации от 4 июня 2008 г. № 889. О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/27565>.
3. Прогноз научно-технологического развития отраслей топливно-энергетического комплекса России на период до 2035 года. Утвержден министерством энергетики Российской Федерации [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/456026524>.
4. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации. Министерство экономического развития Российской Федерации, Москва 2019 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.economy.gov.ru/>.
5. Цыбатов В.А. Экономический рост как важнейший фактор снижения энергоемкости валового регионального продукта [Электронный ресурс] / В.А. Цыбатов // Экономика региона. – 2020. Т. 16, вып. 3. С. 739-753. – Режим доступа: <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2020-3-5>.
6. Башмаков И.А., Мышак А.Д. Энергопотребление регионов России. О реальной динамике и о качестве статистики [Электронный ресурс] / И.А. Башмаков, А.Д. Мышак // Энергосбережение. – 2016. – № 4. – Режим доступа: [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=6417](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6417).
7. Башмаков И.А., Мышак А.Д. Энергопотребление регионов России. О реальной динамике и о качестве статистики [Электронный ресурс] / И.А. Башмаков, А.Д. Мышак // Энергосбережение. – 2016. – № 5. – Режим доступа: [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=6436](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=6436).

8. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Хрестоматия Энергосбережения: Справочное издание: в 2-х книгах. Книга 1 / Под ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2005. – 688 с.
9. Ключевые направления повышения энергетической эффективности крупных промышленных предприятий / С.М. Брыкалов, А.С. Балыбердин, В.Ю. Трифионов, Р.В. Засухин // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2020. – №5. – С. 10-18.
10. Литвак В.В. Региональный вектор энергосбережения / В.В. Литвак, В.А. Силич, М.И. Яворский. – Томск: СТТ, 1999. – 320 с.
11. Паламарчук А.Г. Анализ современного состояния энергосбережения в российской промышленности / А.Г. Паламарчук // Научные труды вольного экономического общества России. – 2020. – №2. – С. 362-379.
12. Назмеев Ю.Г. Организация энерготехнологических комплексов в нефтехимической промышленности / Ю.Г. Назмеев, И.А. Конахина. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 364 с.
13. Белова Т.Д. Типология регионов РФ по ключевым показателям энергоэффективности / Т.Д. Белова // Вестник ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – №4. – С. 70-75.
14. Гашо Е.Г. Развитие регионов через повышение энергоэффективности / Е.Г. Гашо, М.В. Степанова // Энергетическая политика. – 2015. – №3. – С. 59-66.
15. Хуршудян Ш.Г. Типология регионов РФ по структуре ВРП как фактору энергоемкости экономики: методические аспекты / Ш.Г. Хуршудян // Вестник волгоградского государственного университета. серия 3: экономика. Экология. – 2016. – № 3 (36). – С. 66-78.
16. ТЭК и экономика регионов России. Справочник. Т. 4. – М.: ИД «Энергия», 2007. – 456 с.
17. Картавцев С.В. Теплоэнергетические системы и энергетические балансы промышленных предприятий: учеб. Пособие / С.В. Картавцев. – 2-е изд. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. Гос. Техн. Ун-та им. Г.И. Носова, 2017. – 155с.

18. Цветков В.В., Организация пароснабжения промышленных предприятий / В.В. Цветков. М.: Энергия, 1980. – 206 с.
19. Вагин Г.Я., Лоскутов А.Б., Экономия энергии в промышленности: Учеб. Пособие / Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов; Нижегород. Гос. Техн. Ун-т. – Н. Новгород, 1998. – 220 с.
20. Ключников А.Д. Интенсивное энергосбережение: предпосылки, методы, следствия / А.Д. Ключников // Теплоэнергетика. – 1994. – №1. – С. 12-16.
21. Концепция энергосбережения и экологизации промышленных предприятий / Д.Г. Закиров, Б.Н. Головкин, А.П. Старцев // Теплоэнергетика. – 1997. – №11. – С. 22-25.
22. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации, Министерство экономического развития Российской Федерации, Москва 2020 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.economy.gov.ru>.
23. Назмеев Ю.Г. Теплоэнергетические системы и энергобалансы промышленных предприятий: учеб. пособие для студентов вузов / Ю.Г. Назмеев, И.А. Коныхина. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 407 с.
24. Государственный доклад о состоянии энергосбережения и повышении энергетической эффективности в Российской Федерации, Министерство экономического развития Российской Федерации, Москва 2021 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.economy.gov.ru>.
25. Проведение анализа энергоэффективности основного энергопотребляющего оборудования по представленным данным телевизионного контроля и разработка мероприятий по экономии энергоносителей, поступающих из системы внешнего энергоснабжения объектов ПАО «Татнефть»: отчёт о НИР, 2020.
26. Об утверждении порядка определения нормативов технологических потерь при передаче тепловой энергии, теплоносителя. Приказ Министерства



энергетики РФ от 30 декабря 2008 г. № 325 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/902148459>.

27. Гурьев В.В. Тепловая изоляция в промышленности. Теория и расчет / В.В. Гурьев, В.С. Жолудов, В.Г. Петров-Денисов – М.: Стройиздат, 2003. – 416 с.

28. ГОСТ 4.201-79 Система показателей качества продукции (СПКП). Строительство. Материалы и изделия теплоизоляционные. Номенклатура показателей. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 7 с.

29. Шойхет Б.М. Развитие производства и применения теплоизоляционных материалов в России в 1998–2006 годах [Электронный ресурс] / Б.М. Шойхет // Энергосбережение. – 2007. – №5. – Режим доступа: [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=3704](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3704).

30. Популярные теплоизоляционные материалы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://marketing.rbc.ru/articles/11396>.

31. Закирова И.А. Повышение эффективности энерготехнологических комплексов и систем теплоснабжения тонкопленочным покрытием тепловой изоляции трубопроводов: дис. канд. тех. наук 05.14.01/ Закирова Ильмира Асхатовна. – Казань., 2019. – 239 с.

32. Garay Martinez, R., Goiti, E., Reichenauer, G., Zhao, S., Koebel, M., Barrio, A. Thermal assessment of ambient pressure dried silica aerogel composite boards at laboratory and field scale (2016) *Energy and Buildings*, 128, pp. 111-118, DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.06.071

33. Shafi, S., Tian, J., Navik, R., Gai, Y., Ding, X., Zhao, Y. Fume silica improves the insulating and mechanical performance of silica aerogel/glass fiber composite (2019) *Journal of Supercritical Fluids*, 148, pp. 9-15, DOI: 10.1016/j.supflu.2019.02.027

34. Berardi, U., (Mark) Zaidi, S. Characterization of commercial aerogel-enhanced blankets obtained with supercritical drying and of a new ambient pressure drying blanket (2019) *Energy and Buildings*, 198, pp. 542-552. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.06.027

35. Agnieszka Śłosarczyk, Strauchmann Wojciech, Ziółkowski Piotr, Jakubowska Paulina, Synthesis and characterization of carbon fiber/silica aerogel nanocomposites (2015) *Journal of Non-Crystalline Solids*, 416, pp. 1-3. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2015.02.013
36. Hung, W.-C., Horng, R.S., Shia, R.-E. Investigation of thermal insulation performance of glass/carbon fiber-reinforced silica aerogel composites (2021) *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 97 (2), pp. 414-421, DOI: 10.1007/s10971-020-05444-3
37. Luo, Y., Jiang, Y., Feng, J., Guan, Y., Feng, J. Progress on the Preparation of SiO<sub>2</sub> Aerogel Composites by Ambient Pressure Drying Technique (2018) *Cailiao Daobao/Materials Review*, 32 (3), pp. 780-787. DOI: 10.11896/j.issn.1005-023X.2018.05.014
38. Berardi, U. Aerogel-enhanced systems for building energy retrofits: Insights from a case study (2018) *Energy and Buildings*, 159, pp. 370-381. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.10.092
39. Lee, K.-Y., Mahadik, D.B., Parale, V.G., Park, H.-H., Composites of silica aerogels with organics: a review of synthesis and mechanical properties (2020) *Journal of the Korean Ceramic Society*, 57 (1), DOI: 10.1007/s43207-019-00002-2
40. Fomitchev, D.V., Trifu, R., Gould, G. Fiber Reinforced Silica Aerogel Composites: Thermal Insulation for High-Temperature Applications (2004) *Engineering Construction and Operations in Challenging Environments Earth and Space*, DOI: 10.1061/40722(153)132
41. Свод правил: СП 61.13330.2012. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов [Текст]: нормативно-технический материал. Введ. 01.01.2013. – М.: Минрегион России, 2012.
42. Свод правил: СП 41-103-2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов [Текст]: нормативно-технический материал. Введ. 01.01.2013. – М.: Минрегион России, 2012.
43. ГОСТ 31912-2011 (EN ISO 23993:2008) Изделия теплоизоляционные, применяемые для инженерного оборудования зданий и промышленных установок.

Определение расчетной теплопроводности. Издание официальное, Москва. Стандартиформ, 2014 г., – 28 с.

44. ГОСТ Р 57418-2020 Материалы и изделия минераловатные теплоизоляционные. Метод оценки устойчивости характеристик теплопроводности к воздействию знакопеременных температур. Издание официальное, Москва. Стандартиформ, 2020 г., – 12 с.

45. Рахимов, Р. З. Теплоизоляция из каменной ваты: учебное пособие / Рахимов Р. З., Шелихов Н. С., Смирнова Т. В. - Москва: Издательство АСВ, 2010. – 312 с.

46. ГОСТ EN 14707-2011 Изделия теплоизоляционные, применяемые для инженерного оборудования зданий и промышленных установок. Метод определения максимальной рабочей температуры цилиндров заводского изготовления. Издание официальное, Москва. Стандартиформ, 2015 г., – 16 с.

47. Жолудов, В.С. Повышение теплозащитных свойств теплоизоляционных конструкций из волокнистых материалов для промышленных сооружений: дис. ...канд. техн. наук. – М., 2000. – 197 с.

48. Смирнова К.И. Повышение эксплуатационной надежности теплоизоляционных конструкций промышленных сооружений с учетом влагообменных характеристик газонаполненных материалов: дис. ...канд. техн. наук: 2005. М., 2005. – 168 с.

49. Гурьев В.В., Жолудов В.С., Петров-Денисов В.Г., Смирнова К.И. Влияние влагообмена на теплозащитные свойства изоляции промышленных сооружений // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2005. – №1. – С.18-28.

50. Кришер О. Научные основы техники сушки. М., Изд. ин. лит., 1961, – 539 с.

51. Лыков А.В. Теоретические основы строительной теплофизики. Минск, Наука и техника, 1961, – 519 с.

52. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967, – 599 с.

53. Лыков А.В., Максимов Г.А. Тепло- и массообмен в капиллярно-пористых телах. М.: Госэнергоиздат, 1957.
54. Лыков А.В. Тепломассообмен. М., Энергия, 1978, – 480 с.
55. Петров-Денисов В.Г., Масленников Л.А. Процессы тепло-и влагообмена в промышленной изоляции. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 193с.
56. Киселев И.Я. Повышение точности определения теплофизических свойств теплоизоляционных строительных материалов с учетом их структуры и особенностей эксплуатационных воздействий: дис. док. тех. наук: 2006, – 366 с.
57. Семенов В.Г. Определение фактических тепловых потерь через теплоизоляцию в сетях централизованного теплоснабжения // Новости теплоснабжения. – 2003. – № 4. – С. 30-33.
58. Байбаков С.А. К вопросу о методах и проблемах определения фактических тепловых потерь в тепловых сетях // Новости теплоснабжения. – 2010. – № 6. – С. 36-39.
59. Хромченков В.Г., Иванов Г.В., Хромченкова Е.В. Определение потерь тепла в тепловых сетях // Новости теплоснабжения. – 2006. – № 6. – С. 39-43.
60. Байбаков С.А., Тимошкин А.С. Методики определения и оценки фактических потерь через изоляцию в водяных сетях систем централизованного теплоснабжения без отключения потребителей // Новости теплоснабжения. – 2009. – № 5. – С. 38-44.
61. Иванов В.В., Букаров Н.В., Василенко В.В. Влияние увлажнения изоляции и грунта на тепловые потери подземных теплотрасс // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 7 (23). – С. 32-33.
62. Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Оценка масштабов тепловых потерь в магистральных теплотрубопроводах в условиях затопления // Промышленная энергетика. – 2006. – № 8. – С.32-34.
63. Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Анализ тепловых потерь теплотрубопроводов в условиях взаимодействия с влажным воздухом // Энергосбережение и водоподготовка. – 2009. – № 2. – С. 37-40.

64. Половников В.Ю. Математическое моделирование тепловых режимов теплотрубопроводов в условиях увлажнения изоляции: Дис. канд. тех. наук: 14.05.2004 г., защищена 25.12.2006 г. Томск: Б.и., 2006, 122 с. Библиогр.: с. 112-122.
65. Половников В.Ю. Тепловые режимы и тепловые потери подземных трубопроводов с учетом реальных условий теплообмена на внешнем контуре взаимодействия // Известия томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – №1. – С. 124-131.
66. Немова Т.Н., Лежнева Ю.А., Цветков Н.А., Алексеева Е.Г. / Влияние изменения теплопроводности теплоизоляционных материалов на тепловые потери магистральных трубопроводов // Вестник Томского гос. Архитектурно-строит. унив. - 2016. - №5. – С. 151-160.
67. Цыганкова Ю.С. / Экспресс-оценка потерь тепловой энергии в сетях теплоснабжения // Проблемы энергетики. – 2014. - № 5-6. - С. 23-28.
68. 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.
69. 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.
70. Ахметова И. Г., Чичирова Н.Д. К вопросу о методике расчёта тепловых потерь в сетях централизованного теплоснабжения // Новости теплоснабжения. – 2– 017. – №4 (200), www.nts.ru.
71. Шойхет Б.М. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Современное состояние и перспективы развития “Энергосбережение” 2005
72. Дементьев А.Г. Оценка срока службы пенополиуретанов для теплоизоляции // Журнал «Пенополиуретан» – 2000. – № 2. – С.38-41.
73. 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>.

74. 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.

75. Kruczek T. Determination of annual heat losses from heat and steam pipeline networks and economic analysis of their thermomodernisation. Energy, Volume 62, 1, December 2013, pp. 120-131

76. 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.

77. ГОСТ 25380-2014 Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции. - М.: Стандартинформ, 2015. – 14 с.

78. ГОСТ 32025-2012 Тепловая изоляция. Метод определения характеристик теплопереноса в цилиндрах заводского изготовления при стационарном тепловом режиме. Издание официальное, Москва. Стандартинформ, 2014 г., – 23 с.

79. 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.

80. ГОСТ 32025-2012 Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. Официальное издание, М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2000 г., – 10 с.

81. 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.

82. Hoseini, A., Malekian, A., Bahrami, M. Deformation and thermal resistance study of aerogel blanket insulation material under uniaxial compression (2016) *Energy and Buildings*, 130, pp. 228-237.

83. D.V. Okhrimenko, A.B. Thomsen, M. Ceccato, D.B. Johansson, D. Lybye, K. Bechgaard, S. Tougaard, S.L.S. Stipp, Impact of curing time on ageing and degradation of phenol-urea-formaldehyde binder, *Polymer Degradation and Stability*, Volume 152, 2018, Pages 86-94.

84. 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>.

85. Я. Чэнь, П.С. Мараховский, Г.В. Малышева, Определение теплофизических свойств эпоксидных материалов в процессе их отверждения/ Электронный научный журнал «Труды ВИАМ» №9, 2018 г.

86. Okhrimenko, D.V., Thomsen, A.B., Ceccato, M., Johansson, D.B., Lybye, D., Bechgaard, K., Tougaard, S., Stipp, S.L.S. Impact of curing time on ageing and degradation of phenol-urea-formaldehyde binder (2018) *Polymer Degradation and Stability*, 152, pp. 86-94.

87. Пивень А.Н. Теплофизические свойства полимерных материалов [Текст]: Справочник / А. Н. Пивень, Н. А. Гречаная, И. И. Чернобыльский. - Киев: Вища шк., 1976. - 179 с.

88. Иванцов А.И. Прогнозирование срока службы наружных стен жилых зданий по потере требуемой теплозащиты: дис. ...канд. техн. Наук: 05.23.01 / А.И. Иванцов, Казань 2014

89. С.В. Александровский Долговечность наружных ограждающих конструкций. Научно-исследовательский институт строительной физики (НИИСФ) Российской Академии Архитектуры и строительных наук (РААСН), 2003, 333с.

90. Ли А.В. Долговечность энергоэффективных полимерсодержащих ограждающих конструкций: дис. канд. техн. Наук: 05.23.01 / А.В. Ли. – Хабаровск, 2003
91. МДС 41-7.2004 Методика оценки влияния влажности на эффективность теплоизоляции оборудования и трубопроводов Москва 2004
92. Бобров Ю.Л. Долговечность теплоизоляционных минераловатных материалов – М.: Стройиздат, 1987. – 168 с.
93. Nosrati, R., Berardi, U. Long-term performance of aerogel-enhanced materials (2017) *Energy Procedia*, 132, pp. 303-308 DOI: 10.1016/j.egypro.2017.09.733
94. Ярцев В.П., Прогнозирование поведения строительных материалов при неблагоприятных условиях эксплуатации: учебное пособие/ Ярцев В.П., Киселева О.А. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 124 с.
95. Sergey Vyazovkin. Isoconversional Kinetics of Thermally Stimulated Processes. Springer International Publishing Switzerland 2015, 239 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14175-6>
96. Prime, R.B., Bair, H.E., Vyazovkin, S., Gallagher, P.K., Riga, A. Thermogravimetric Analysis (TGA) (2008) *Thermal Analysis of Polymers: Fundamentals and Applications*, pp. 241-317
97. Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry. Recent Advances, Techniques and Applications/ Editors: Michael Brown, Patrick Gallagher, Elsevier Science 2007, 780 p.
98. Sasca, V.Z., Verdeş, O., Popa, A. The estimation of thermal endurance for some heteropoly acidic catalysts from thermogravimetric decomposition data (2017) *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 127 (1), pp. 273-282.
99. Jiang, H., Wang, J., Wu, S., Wang, B., Wang, Z. Pyrolysis kinetics of phenol-formaldehyde resin by non-isothermal thermogravimetry (2010) *Carbon*, 48 (2), pp. 352-358.
100. ГОСТ Р 57946-2017 Расчет термической устойчивости материалов из данных термогравиметрии разложения. Издание официальное. Москва Стандартинформ 2017 – 15 с.



101. Vyazovkin, S., Burnham, A.K., Criado, J.M., Pérez-Maqueda, L.A., Popescu, C., Sbirrazzuoli, N. ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data (2011) *Thermochimica Acta*, 520 (1-2), pp. 1-19.

102. Vyazovkin, S., Wight, C.A. Isothermal and nonisothermal reaction kinetics in solids: In search of ways toward consensus (1997) *Journal of Physical Chemistry A*, 101 (44), pp. 8279-8284.

103. Vyazovkin, S. *Isoconversional Kinetics of Polymers: The Decade Past* (2017) *Macromolecular Rapid Communications*, 38 (3), № 1600615

104. ГОСТ Р 57951-2017 Определение кинетических параметров разложения материалов с использованием термогравиметрии и метода Озавы-Флинна-Уолла. Издание официальное. Москва Стандартинформ, 2017 – 20 с.

105. ГОСТ Р 56721-2015 (ИСО 11358-1:2014) Пластмассы. Термогравиметрия полимеров. Часть 1. Общие принципы. Издание официальное. Москва Стандартинформ, 2016 – 12 с.

106. C. Siligardi, P. Miselli, E. Francia, M. Lassinantti Gualtieri. Temperature-induced microstructural changes of fiber-reinforced silica aerogel (FRAB) and rock wool thermal insulation materials: A comparative study. *Energy and Buildings*. Volume 138, 1 March 2017, Pages 80-87.

107. 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.

108. 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.

109. Ю.Г. Иващенко, Б.А. Семенов, Г.Г. Старостин, А.Ю. Букарева, О.П. Хомякова Критерии технико-экономической оценки потенциальной

эффективности теплоизоляционных материалов с учетом их долговечности. // Известия вузов. Строительство. - 2004. - №2. - С. 32-38.

110. Методические рекомендации по расчету эффектов от реализации мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности <https://minstroyrf.gov.ru/docs/11291/>

111. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов, официальное издание / Утверждено: Министерство экономики РФ, Министерство финансов РФ, Гос. Комитет РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике №ВК 477 от 21.06.1999г., М.: Экономика, 2000 - 414 с.

112. Виленский П.Л., Лившиц В.Н., Смоляк С.А. Оценка эффективности инвестиционных проектов. Теория и практика: Учебное пособие – 2-е изд., перераб и доп – М.: Дело, 2022 – 888 с.

113. Шубин Е.П., Материалы, методы устройства и расчет тепловой изоляции трубопроводов, М.: Госэнергоиздат, 1948 – 135 с.

114. Хижняков С.В. Практические расчеты тепловой изоляции / Хижняков С.В. // для пром. оборудования и трубопроводов; 3-е изд., перераб. - М.: Энергия, 1976.-200 с.

115. Хомякова О.П. Оптимизация теплозащиты трубопроводов и оборудования тепловых сетей: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04. Саратов, 2007. 206 с.

116. ТСН 23-305-99 СарО. Энергетическая эффективность в жилых и общественных зданиях. Нормативы по теплозащите. Издание официальное. – Саратов .200. – 55 с.

117. ТСН 23-318-2000 РБ. Тепловая защита зданий. Нормы проектирования. Издание официальное. – Уфа, 2001. – 59 с.

118. 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.

119. СО 153-34.17.464-2003 Инструкция по продлению срока службы трубопроводов II, III и IV категорий. Издание официальное. М.: ЦПТИ ОРГРЭС, 2004 год. – 146 с.

120. Техническая изоляция и огнезащита от производителя [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://reterma.ru/product/mpb-30-0-2000-1000-80/> (дата обращения: 21.05.2022).

121. Венторус [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://xn--b1agyekgek.xn--p1ai/catalog/aerogel/aerogel\\_evergel/](https://xn--b1agyekgek.xn--p1ai/catalog/aerogel/aerogel_evergel/) (дата обращения: 21.05.2022).

122. Венторус [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://xn--b1agyekgek.xn--p1ai/catalog/isomag\\_obolochki/](https://xn--b1agyekgek.xn--p1ai/catalog/isomag_obolochki/) (дата обращения: 21.05.2022).

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1. Акты использования и реализации

**ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ  
ОБЩЕСТВО «ТАТНЕФТЬ»  
имени В.Д. Шашина**  
(ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина)



**В.Д. Шашин исемендәге  
«ТАТНЕФТЬ» АЧЫК  
АКЦИОНЕРЛЫК ҖӘМҖИЯТЕ**  
(В.Д. Шашин исемендәге «Татнефть» ААҖ)

ул. Ленина, 75, г. Альметьевск,  
Республика Татарстан, 423450

Ленин ур., 75, Әлмәт шәһәре,  
Татарстан Республикасы, 423450

Телеграф: Альметьевск, Татарстан, «Татнефть»; телетайп 724149 RADUG RU  
Телефон: справочная 37-11-11; факс: (8553) 30-78-00, 31-86-46; канцелярия 45-64-92; e-mail: tnr@tatneft.ru  
ИНН/КПП 1644003838/164401001, расчетный счет №40702810700730001890 в ПАО Банк Зенит,  
корреспондентский счет №3010181000000000272, БИК 044525272

«17» февраля 2022 г. № 424/Исх

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

Начальник отдела энергообеспечения и  
энергоэффективности управления энергетикой

  
\_\_\_\_\_ А.Р. Хафизов

АКТ

внедрения результатов  
диссертационного исследования

Настоящим актом удостоверяем, что положения и результаты диссертационного исследования Базуковой Эльвиры Раисовны по повышению эффективности энерготехнологических комплексов были использованы в целях повышения энергетической эффективности системы пароснабжения предприятий шинного комплекса ПАО «Татнефть».

Разработанное в диссертации устройство по измерению плотности теплового потока на работающем паропроводе и методика оценки эффективности применяемых теплоизоляционных материалов применены при проведении энергетического аудита с целью устранения сверхнормативных потерь тепловой энергии.

Члены комиссии:

Заместитель начальника отдела энергообеспечения  
и энергоэффективности управления энергетикой, к.т.н.



И.С. Мухортов

Ведущий инженер отдела энергообеспечения  
и энергоэффективности управления энергетикой



Ф.Ф. Биалов

Мухортов Иван Сергеевич, заместитель начальника ОЭиЭ УЭ  
8(8553)305-113



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
 Федеральное государственное бюджетное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
 (ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и  
 коммерциализации



Ившин И.В.

«03» 09 2022г.

АКТ

использования результатов диссертационной работы

Настоящий акт составлен о том, что результаты исследования Базуковой Э.Р. полученные при подготовке диссертационной работы «Повышение эффективности энергетических комплексов применением тепловой изоляции со стабильными характеристиками» используются в учебном процессе кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» при чтении лекций по дисциплине «Источники и системы теплоснабжения».

Использование полученных результатов позволило повысить качество образовательного процесса.

Заместитель заведующего  
 кафедрой ПТЭ по НР,  
 к.т.н., доцент кафедры ПТЭ

А.Е. Кондратьев

Заместитель заведующего  
 кафедрой ПТЭ по УР,  
 к.т.н., доцент кафедры ПТЭ

Ш.Г. Зиганшин



Ившин И.В.  
 Ившин И.В.  
 Ившин И.В.

## Приложение 2. Патент на полезную модель





















## Приложение 4. Термограммы исследуемых материалов

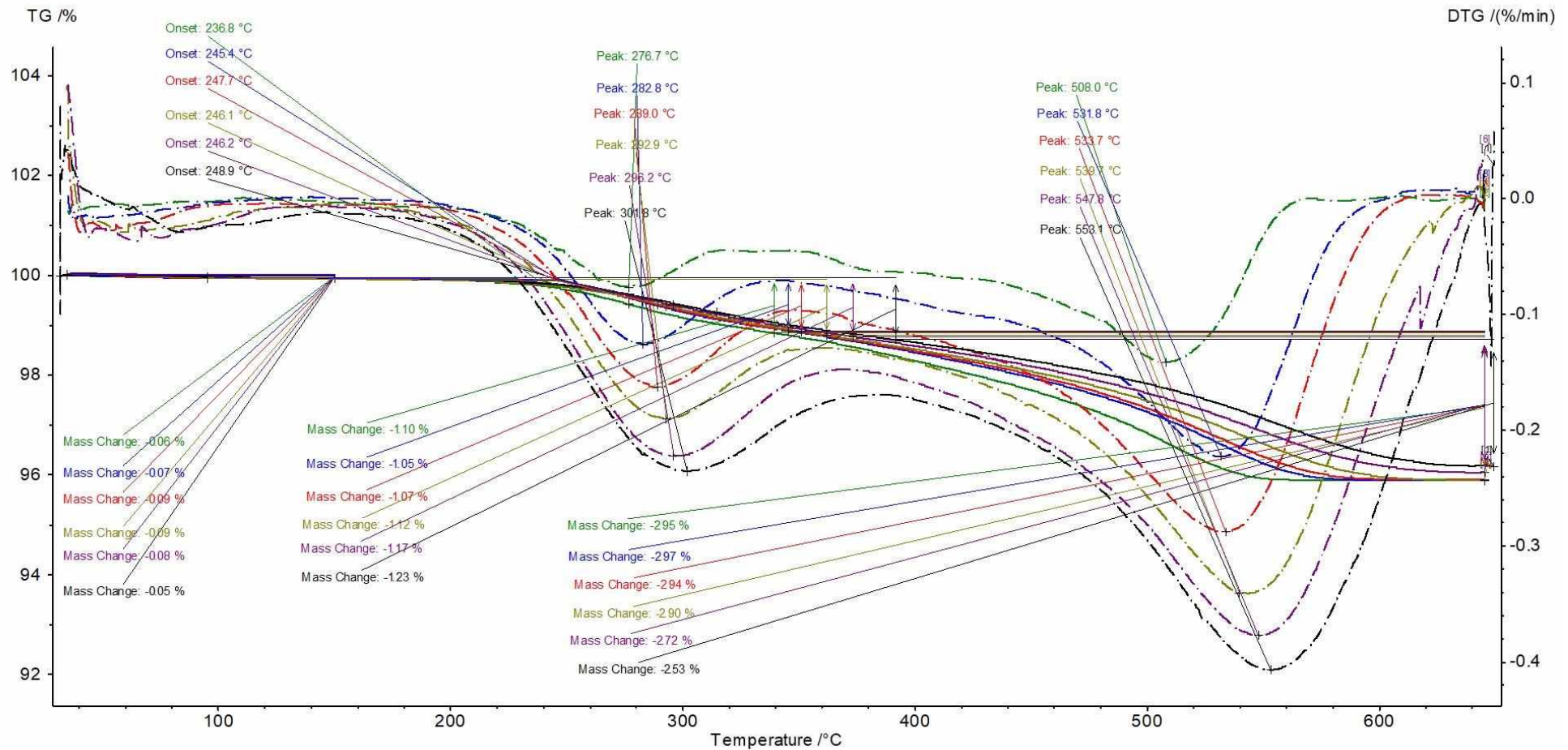


Рис. 4.1 ТГ- и ДТГ-кривые разложения полимерного связующего в базальтовой изоляции BOS 80 при скоростях нагрева 6, 10, 14, 18, 22, 26 °C/мин

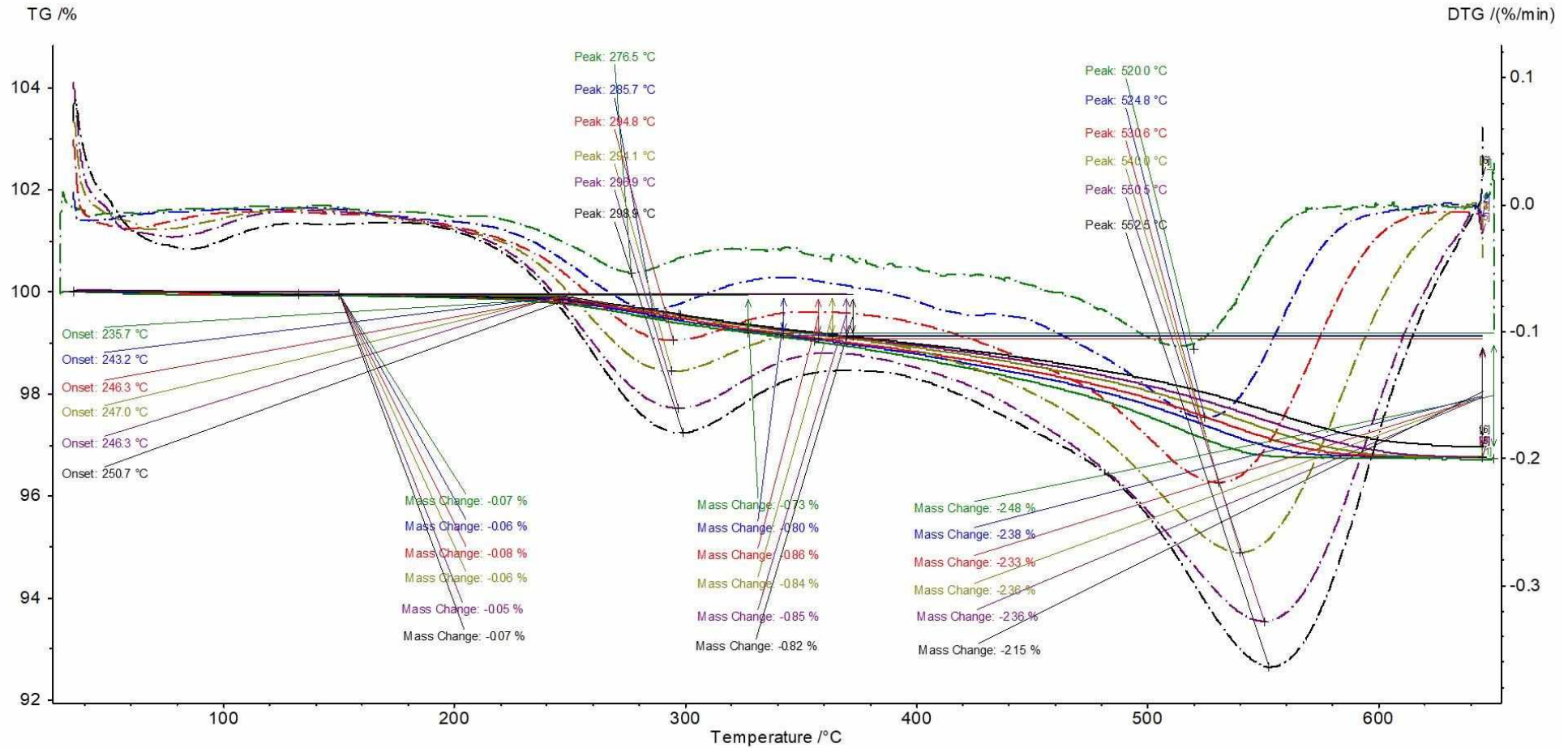


Рис. 4.2 ТГ- и ДТГ-кривые разложения полимерного связующего в базальтовой изоляции BOS 120 при скоростях нагрева 6, 10, 14, 18, 22, 26 °C/мин



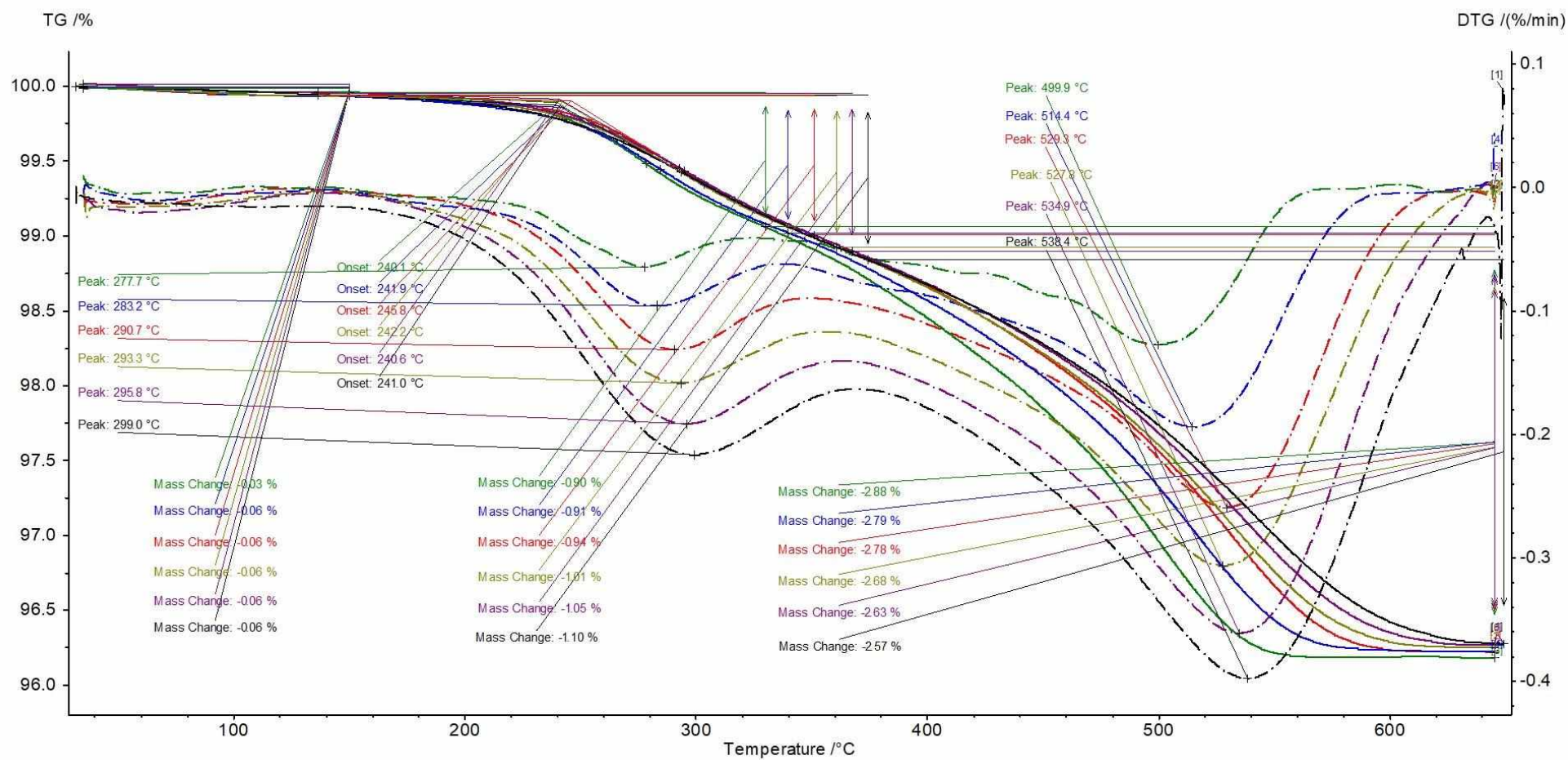


Рис. 4.3 ТГ- и ДТГ-кривые разложения полимерного связующего в базальтовой изоляции Экорол при скоростях нагрева 6, 10, 14, 18, 22, 26 °С/мин

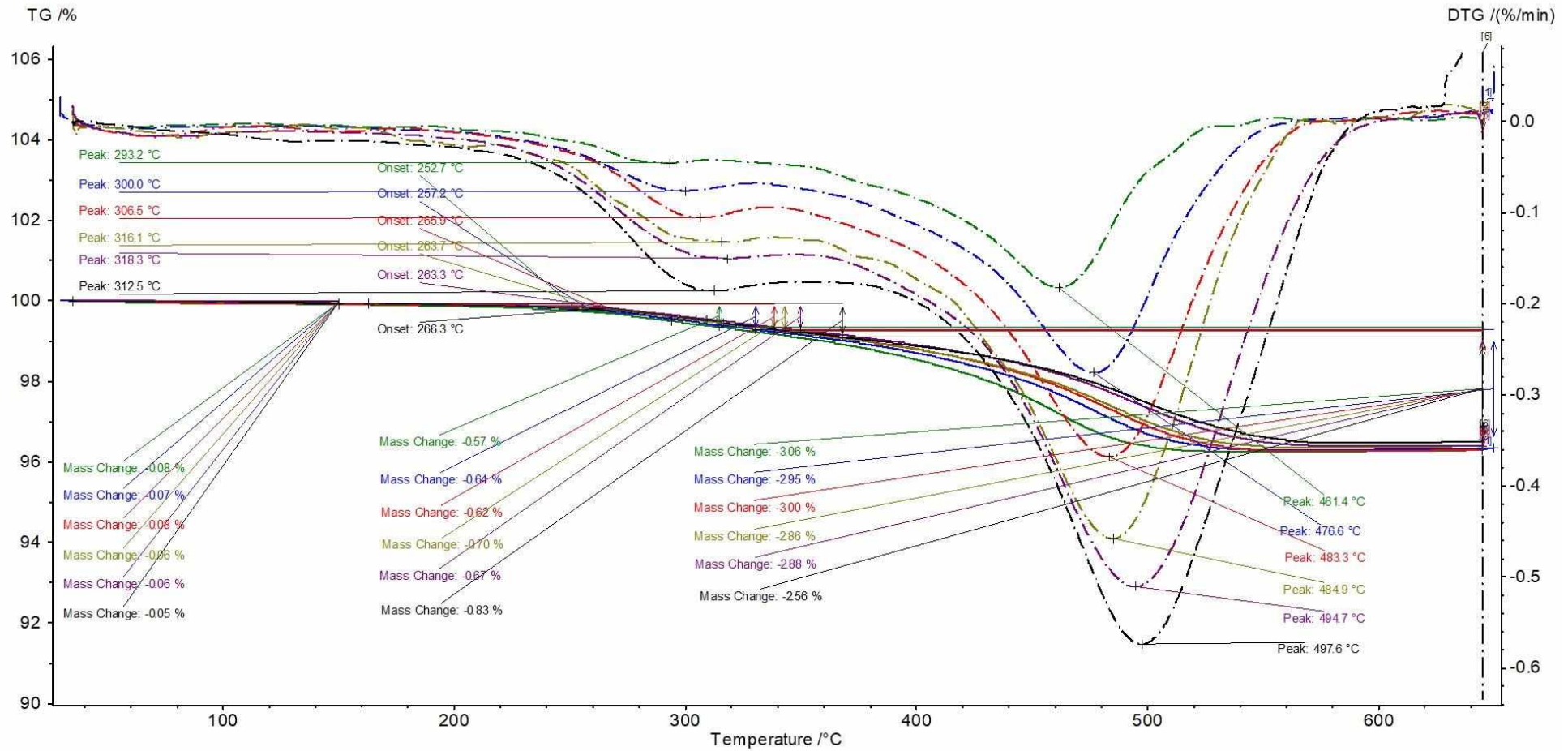


Рис. 4.4 ТГ- и ДТГ-кривые разложения полимерного связующего в базальтовой изоляции Форвард при скоростях нагрева 6, 10, 14, 18, 22, 26 °C/мин

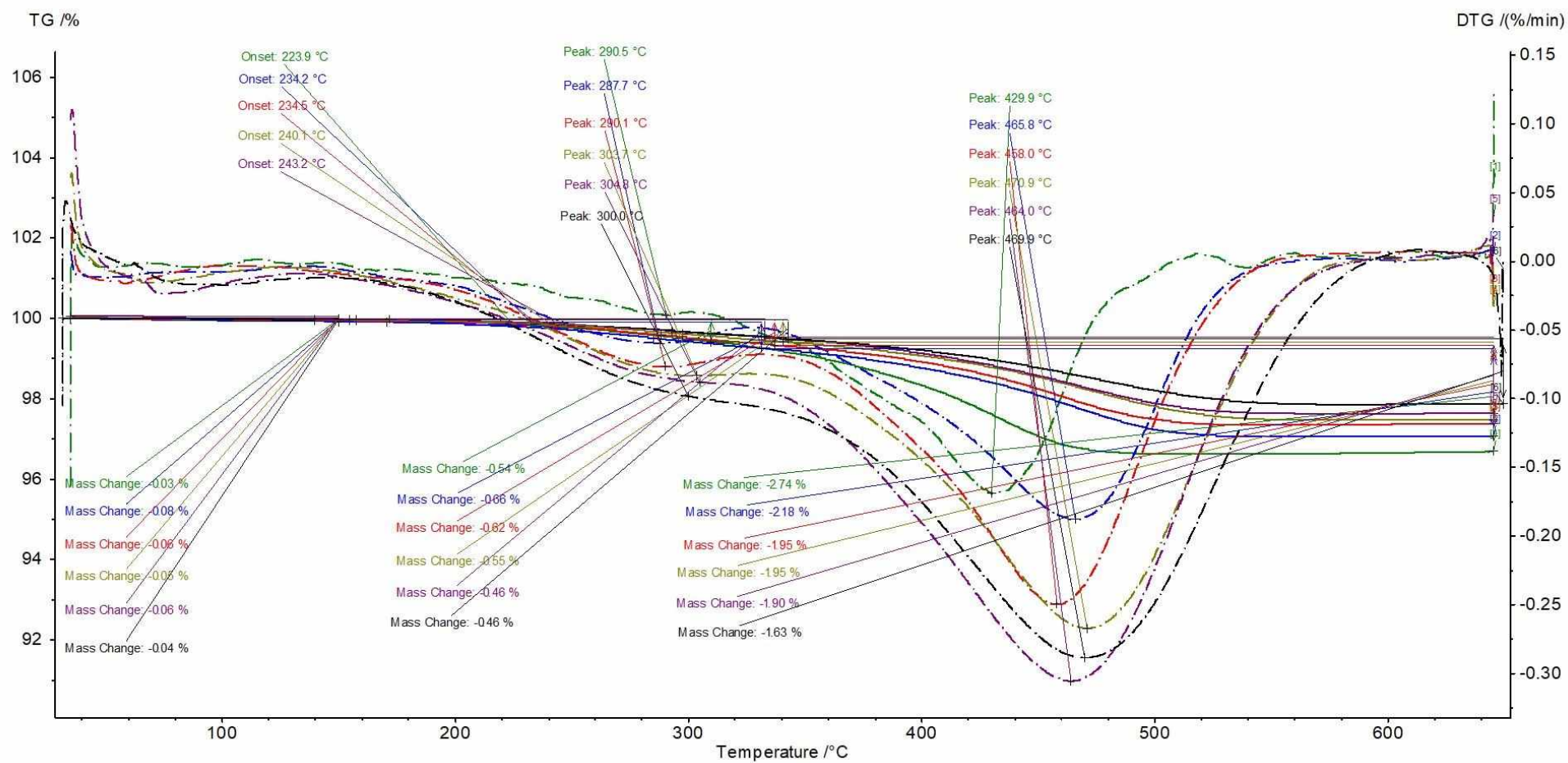


Рис. 4.5 ТГ- и ДТГ-кривые разложения полимерного связующего в базальтовой изоляции Rockwool при скоростях нагрева 6, 10, 14, 18, 22, 26 °C/мин

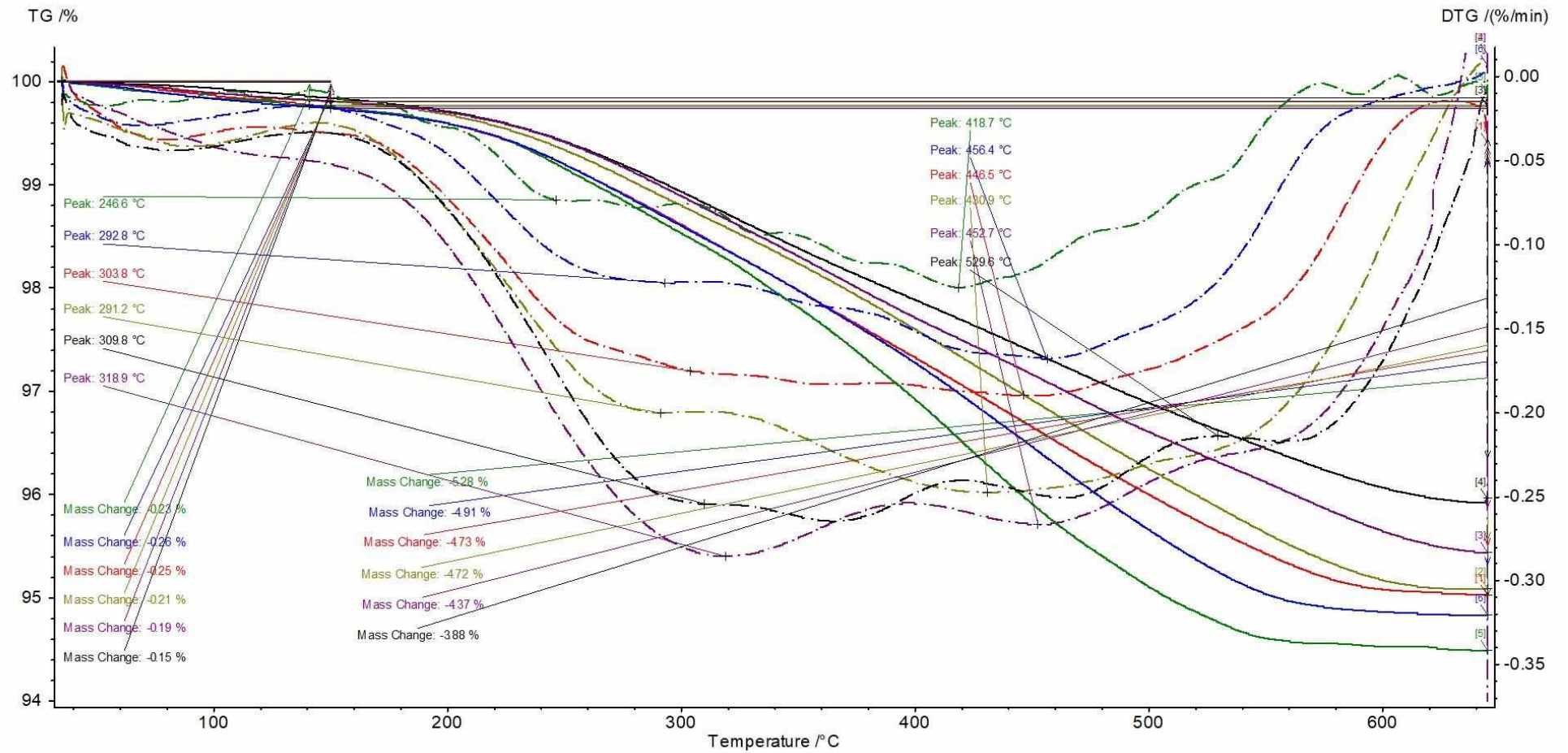


Рис. 4.6 ТГ- и ДТГ-кривые разложения полимерного связующего в базальтовой изоляции URSA M25 при скоростях нагрева 6, 10, 14, 18, 22, 26 °С/мин

## Приложение 5. Изменение степени конверсии исследуемых образцов

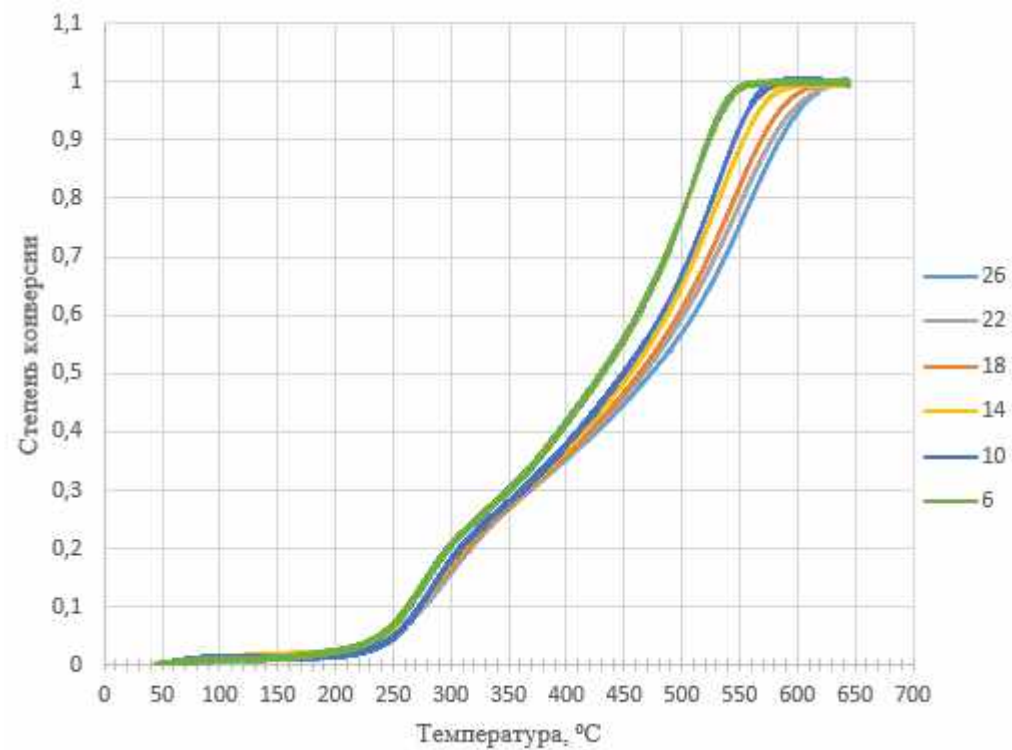


Рис. 5.1 Степень конверсии образцов BOS80 при нагреве до 650 °C при скоростях нагрева 6, 10, 14, 18, 22, 26 °C/мин

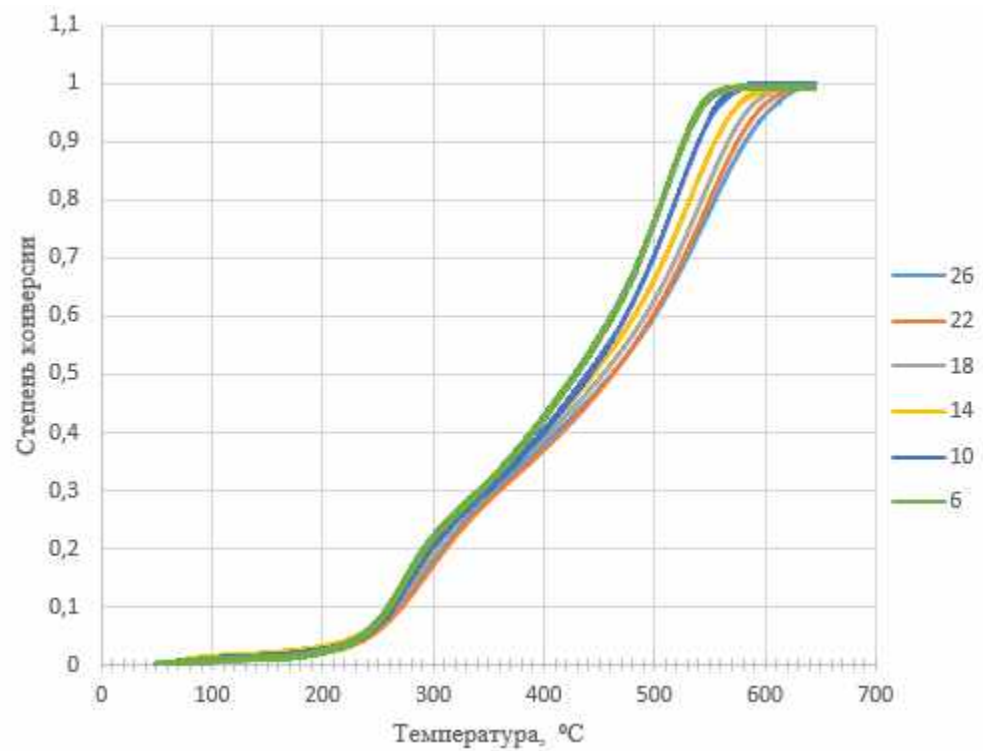


Рис. 5.2 Степень конверсии образцов BOS100 при нагреве до 650 °C при скоростях нагрева 6, 10, 14, 18, 22, 26 °C/мин

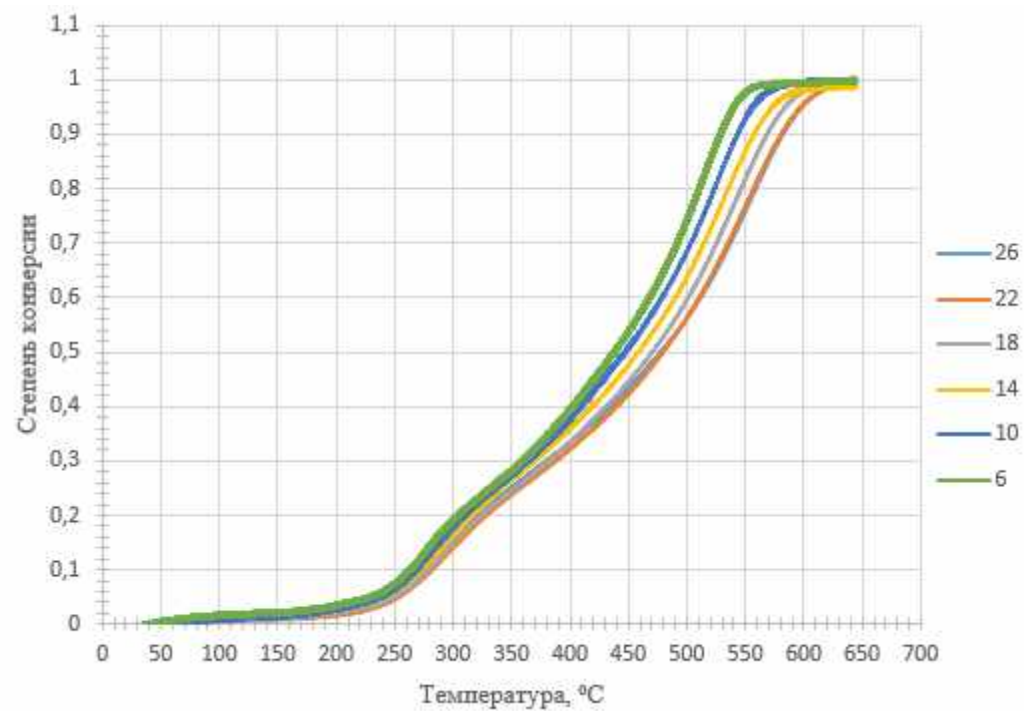


Рис. 5.3 Степень конверсии образцов BOS120 при нагреве до 650 °C при скоростях нагрева 6, 10, 14, 18, 22, 26 °C/мин

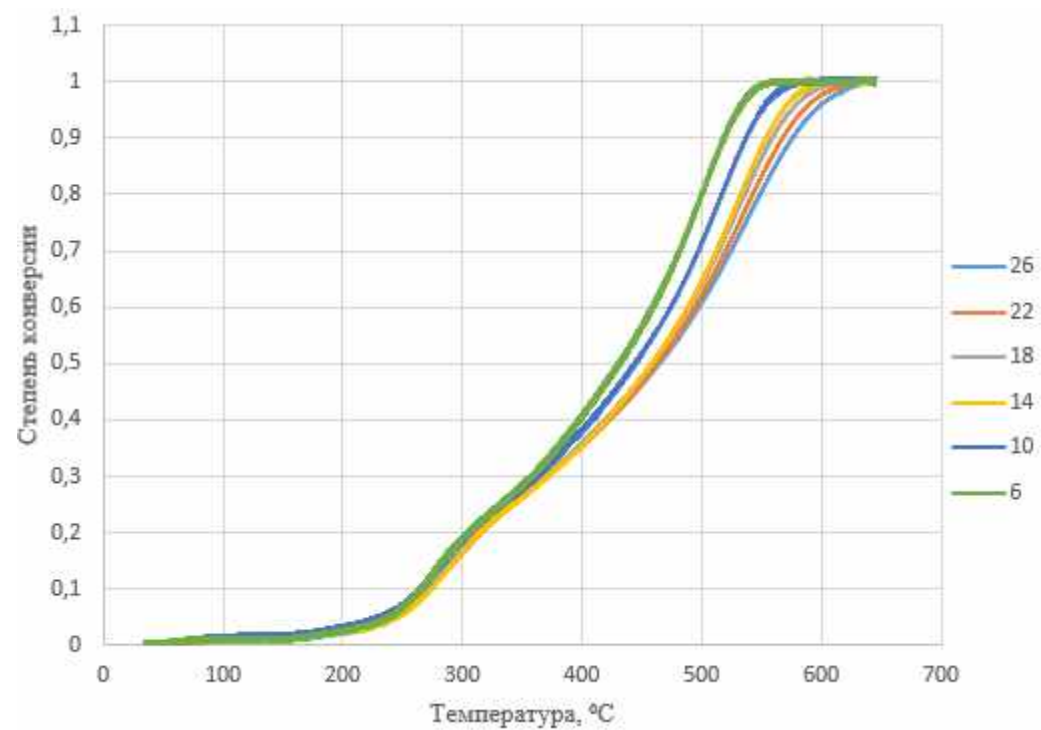


Рис. 5.4 Степень конверсии образцов Экорол при нагреве до 650 °C при скоростях нагрева 6, 10, 14, 18, 22, 26 °C/мин



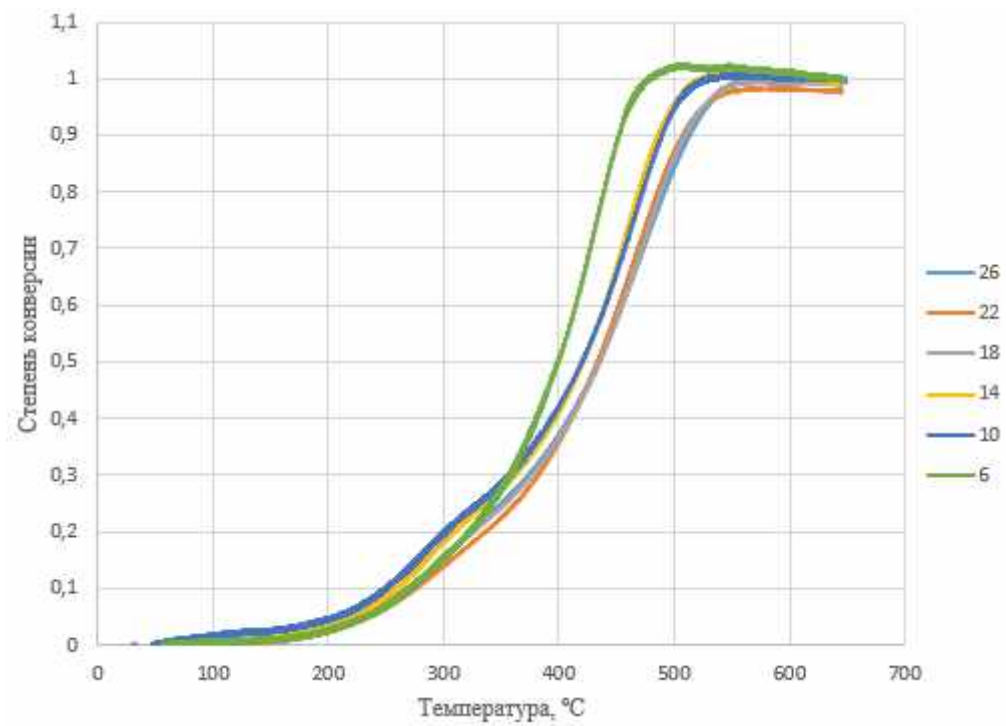


Рис. 5.5 Степень конверсии образцов Rockwool при нагреве до 650 °C при скоростях нагрева 6, 10, 14, 18, 22, 26 °C/мин

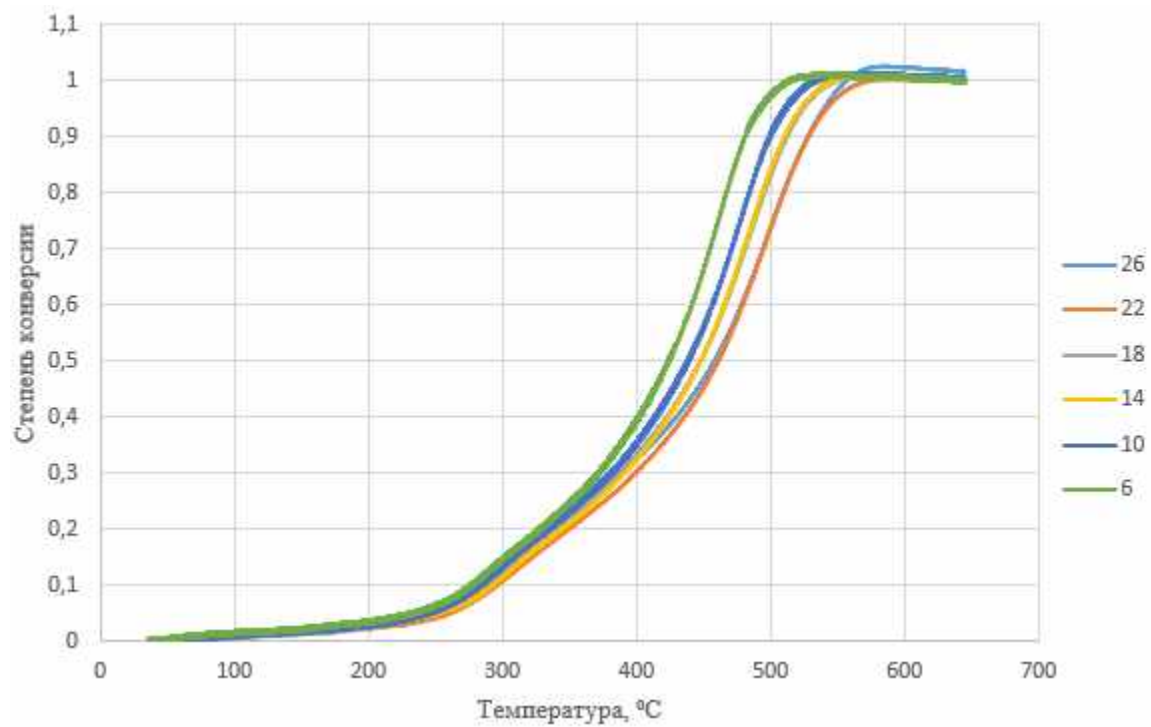


Рис. 5.6 Степень конверсии образцов Форвард при нагреве до 650 °C при скоростях нагрева 6, 10, 14, 18, 22, 26 °C/мин

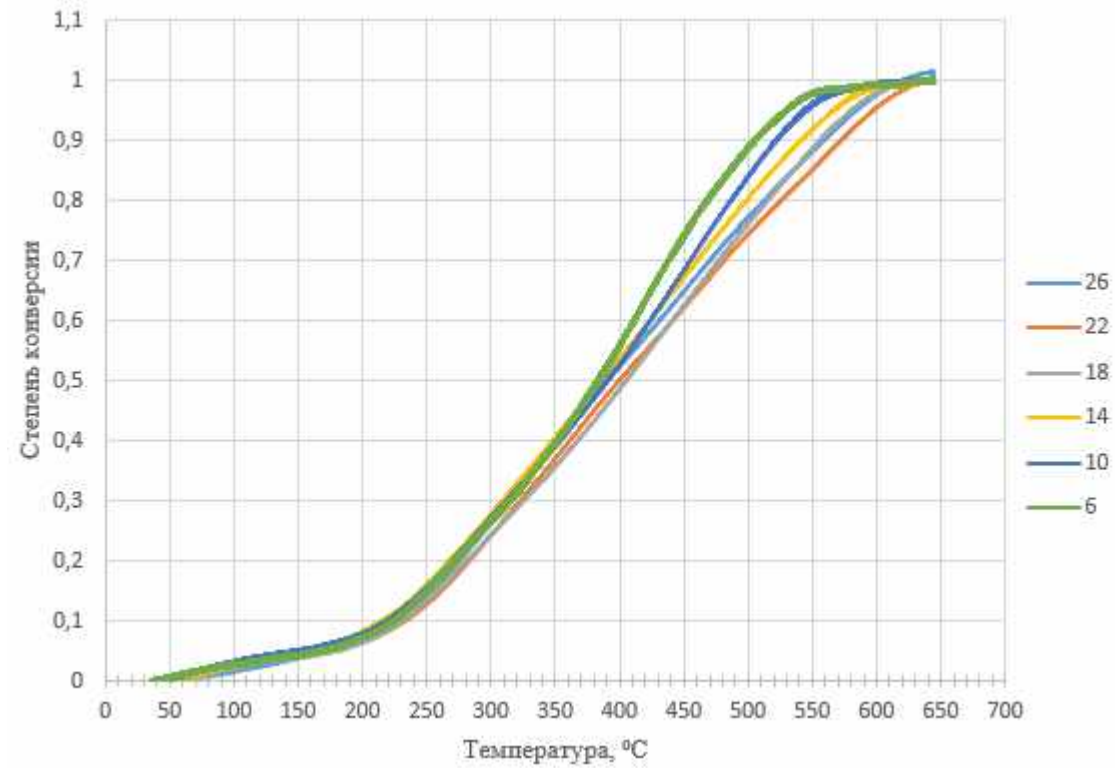


Рис. 5.7 Степень конверсии образцов URSA M25 при нагреве до 650 °C при скоростях нагрева 6, 10, 14, 18, 22, 26 °C/мин

## Приложение 6. Результаты кинетического анализа

Таблица 6.1 Результаты расчета энергии активации, предэкспоненциального множителя, а также отклонение энергии активации методом Озавы-Флинна-Уолла.

$\alpha$	80			100			120			Экорол		
	$E$ , кДж/моль	$\sigma E$ , кДж/моль	$lgA$ , 1/c	$E$ , кДж/моль	$\sigma E$ , кДж/моль	$lgA$ , 1/c	$E$ , кДж/моль	$\sigma E$ , кДж/моль	$lgA$ , 1/c	$E$ , кДж/моль	$\sigma E$ , кДж/моль	$lgA$ , 1/c
0,1	244,65	65,68	20,9	268,58	107,22	23,64	198,54	37,04	16,39	166,02	176,57	13,23
0,15	221,57	28,53	18,09	228,61	45,15	19,06	180,53	26,06	14,12	275,04	98,8	23,11
0,2	205,70	21,43	16,07	194,24	32,16	15,3	168,76	29,96	12,52	296,37	93,59	24,22
0,25	239,74	33,1	18,42	201,15	46,31	15,38	161,38	38,9	11,29	298,77	161,14	23,36
0,3	248,76	39,37	18,31	217,67	71,89	16,11	153,89	36,58	10,11	279,56	128,74	20,68
0,35	214,70	23,3	14,76	221,26	59,87	15,67	144,54	26,32	8,91	230,55	59,95	15,92
0,4	171,36	15,19	10,81	198,20	35,98	13,19	136,07	19,52	7,9	198,68	36,22	12,89
0,45	153,68	11,46	9,09	177,95	22,05	11,15	130,04	15,8	7,19	180,47	26,41	11,12
0,5	145,42	10,56	8,2	169,19	15,24	10,13	132,42	13,93	7,17	173,87	21,46	10,35
0,55	142,45	10,36	7,78	164,17	11,14	9,48	136,04	12,31	7,26	169,54	18,45	9,8
0,6	141,14	10,29	7,52	162,06	8,6	9,11	139,05	11,15	7,33	165,86	16,73	9,36
0,65	140,69	10,08	7,36	160,68	7,81	8,84	142,59	10,64	7,46	165,13	15,03	9,16
0,7	140,64	9,72	7,26	158,07	7,59	8,52	144,88	10,39	7,53	161,56	13,06	8,79
0,75	138,78	9,1	7,05	153,60	7,26	8,11	144,85	9,92	7,45	156,25	11,1	8,34
0,8	135,17	8,24	6,74	148,61	7,02	7,69	143,31	9,58	7,28	150,81	9,24	7,89
0,85	130,36	7,29	6,37	142,63	6,74	7,22	140,03	8,96	7,01	144,53	7,4	7,4
0,9	124,40	6,42	5,94	134,78	6,57	6,64	135,37	8,5	6,66	136,69	5,59	6,82
0,95	115,54	5,77	5,34	123,12	6,16	5,84	127,17	7,36	6,09	125,64	3,9	6,04

Продолжение таблицы 6.1

$\alpha$	Форвард			Rockwool			УРСА М			Pyrogel XTE		
	$E$ , кДж/моль	$\sigma E$ , кДж/моль	$lgA$ , 1/c	$E$ , кДж/моль	$\sigma E$ , кДж/моль	$lgA$ , 1/c	$E$ , кДж/моль	$\sigma E$ , кДж/моль	$lgA$ , 1/c	$E$ , кДж/моль	$\sigma E$ , кДж/моль	$lgA$ , 1/c
0,1	184,77	56,52	14,48	10,32	49,89	-2,72	78,22	76,19	5,23	31,22	23,49	0,38
0,15	192,94	58,01	14,63	32,31	60,85	-0,23	123,49	75,14	9,62	292,76	63,58	28,35
0,2	183,59	71,47	13,18	42,27	56,82	0,72	133,58	84,5	10,22	192,31	14,68	17,08
0,25	181,38	65,53	12,44	91,38	59,93	5,1	133,90	101,35	9,86	132,47	7,66	10,65
0,3	186,04	47,14	12,38	162,69	49,14	10,95	92,35	112,06	5,66	103,56	8,55	7,52
0,35	174,33	30,02	11,1	179,14	27,96	11,99	81,76	108,93	4,49	122,18	38,48	8,89
0,4	164,00	21,62	10,05	166,72	22,82	10,73	92,52	108,14	5,27	190,42	38,68	14,18
0,45	158,52	18,44	9,45	153,53	23,83	9,5	123,53	104,1	7,71	175,17	26	11,94
0,5	157,18	16,32	9,21	144,56	25,23	8,66	162,16	85,4	10,62	169,07	34,93	10,7
0,55	157,31	15,12	9,12	138,09	26,23	8,06	175,65	59,86	11,37	186,26	52,04	11,36
0,6	157,18	14,46	9,03	131,71	26,26	7,5	164,32	39,44	10,2	213,82	62,86	12,83
0,65	156,19	13,92	8,9	125,54	25,71	6,97	147,10	27,47	8,65	275,74	79,63	16,67
0,7	154,24	13,48	8,7	119,73	24,73	6,49	133,47	20,75	7,43	396,31	92,75	24,34
0,75	151,27	12,99	8,45	114,26	23,51	6,05	119,75	15,97	6,25	467,74	56,27	28,59
0,8	147,37	12,41	8,13	109,28	22,15	5,65	108,88	13,02	5,32	455,48	36,54	27,37
0,85	142,60	11,84	7,76	104,19	20,6	5,26	103,01	11,48	4,77	488,41	72,14	29,01
0,9	137,60	11,62	7,37	98,56	18,83	4,84	100,98	10,42	4,52	639,62	203,53	37,75
0,95	136,86	12,34	7,27	91,59	16,74	4,33	102,03	10,32	4,49	31,22	23,49	0,38
0,99	146,42	15	7,85	82,41	15,27	3,72	179,97	47,72	9,2	292,76	63,58	28,35

Таблица 6.2 Результаты расчета энергии активации, предэкспоненциального множителя, а также отклонение энергии активации методом Фридмана

$\alpha$	BOS 80			BOS 100			BOS 120			Экорол		
	$E$ , кДж/моль	$\sigma E$ , кДж/моль	$lgA$ , 1/c	$E$ , кДж/моль	$\sigma E$ , кДж/моль	$lgA$ , 1/c	$E$ , кДж/моль	$\sigma E$ , кДж/моль	$lgA$ , 1/c	$E$ , кДж/моль	$\sigma E$ , кДж/моль	$lgA$ , 1/c
0,1	222,31	43,36	18,14	230,43	79,62	19,23	193,69	29,12	15,32	168,57	144,75	12,98
0,15	200,12	21,27	15,45	190,39	37,43	14,81	164,34	26,88	12	257,96	86,53	20,75
0,2	207,66	23,39	15,49	184,61	35,28	13,72	163,64	36,94	11,33	315,72	102,82	24,99
0,25	258,17	39,49	19,04	219,47	58,62	16,12	156,03	43,82	10	304,9	177,6	22,8
0,3	239,64	37,84	16,52	226,69	78,59	15,88	140,55	33,63	8,2	234,14	115,64	15,91
0,35	179,01	20,3	10,99	201,06	52,28	13,04	127,73	20,84	6,83	184,13	49,16	11,33
0,4	143,56	13,48	7,86	172,15	28,29	10,24	121,88	16,52	6,14	170,1	30,36	9,88
0,45	137,69	11,14	7,17	159,56	16,1	8,93	124,79	13,61	6,17	162,72	22,64	9,06
0,5	137,51	11,54	6,96	159,29	11,33	8,63	135,99	11,51	6,81	165,03	18,33	9,01
0,55	138,3	11,79	6,88	157,25	8,04	8,28	139,75	9,88	6,96	160,06	16,82	8,5
0,6	138,65	11,48	6,81	158,2	9,06	8,21	145,7	9,78	7,28	161,09	15,17	8,46
0,65	139,76	20,57	6,83	155,76	35,04	7,95	149,32	27,76	7,47	158,24	82,85	8,19
0,7	136,94	9,98	6,62	148,21	8,8	7,39	146,82	10,01	7,27	147,05	9,89	7,39
0,75	128,03	8,42	6,02	139,2	8,33	6,77	140,74	9,79	6,85	138,2	7,59	6,77
0,8	117,71	7,29	5,36	130,81	8,32	6,21	133,32	9,42	6,37	130,45	5,86	6,25
0,85	108,87	7,17	4,81	119,69	8,27	5,5	124,17	9,03	5,79	120,17	4,28	5,58
0,9	96,79	8,05	4,08	104,62	8,04	4,56	114,07	8,54	5,17	107,31	3,63	4,77
0,95	89,79	12,03	3,71	96,5	8,73	4,08	110,08	6,65	4,93	96,28	2,41	4,09
0,99	71,53	17,38	2,79	73,75	5,92	2,81	172,3	45,26	8,64	110,41	8,28	5

Продолжение таблицы 6.2

$\alpha$	Форвард			Rockwool			УРСА			Pyrogel XTE		
	$E$ , кДж/моль	$\sigma E$ , кДж/моль	$lgA$ , 1/c	$E$ , кДж/моль	$\sigma E$ , кДж/моль	$lgA$ , 1/c	$E$ , кДж/моль	$\sigma E$ , кДж/моль	$lgA$ , 1/c	$E$ , кДж/моль	$\sigma E$ , кДж/моль	$lgA$ , 1/c
0,1	193,84	57,58	14,72	16,03	69,32	-1,82	93,13	78,57	6,34	60,25	30,05	3,27
0,15	197,7	65,35	14,36	24,26	70,2	-1,03	129,54	75,85	9,64	285,17	32,94	26,56
0,2	180,58	78,73	12,15	44,58	56,1	0,71	147,52	93,05	10,91	119,29	9,71	9,06
0,25	174,47	61,15	11,1	115,59	43,04	6,62	144,46	118,93	10,15	78,89	11,48	4,86
0,3	165,03	35,85	9,97	169,2	27,54	10,77	88,63	132,06	4,78	88,27	18,95	5,47
0,35	150,72	21,73	8,61	159,15	27,65	9,72	77,25	119,88	3,6	150,61	61,06	10,56
0,4	147,61	17,27	8,22	142,49	32,47	8,25	92,96	111,62	4,75	194,8	33,5	13,33
0,45	150,07	16,27	8,3	133,52	33,96	7,45	119,89	94,54	6,75	166,38	32,95	10,1
0,5	154,31	14,26	8,55	129,35	33,86	7,07	144,49	67,88	8,45	176,92	43,38	10,22
0,55	156,24	14,15	8,65	121,16	33,64	6,42	143,49	44,07	8,12	204,43	59,44	11,65
0,6	154,24	14,01	8,48	110,79	32,14	5,64	126,37	29,22	6,64	249,06	69,13	14,3
0,65	149,43	69,83	8,13	101,43	68,53	4,96	113,5	77,48	5,53	343,37	30,87	20,27
0,7	142,88	13,47	7,66	93,38	27,82	4,39	103,79	17,01	4,71	463,5	68,99	27,79
0,75	135,28	12,96	7,13	87,04	25,36	3,96	90,76	14,87	3,69	466,6	37,26	27,6
0,8	127,4	12,51	6,58	81,83	22,88	3,61	89,19	13,78	3,5	456,48	54,62	26,58
0,85	121,41	12,79	6,15	75,16	20,41	3,17	92,27	12,87	3,66	553,61	109,63	32,18
0,9	124,15	14,1	6,32	67,56	18,05	2,68	99,71	12,39	4,12	805,43	252,89	46,82
0,95	146,49	16,1	7,76	64,39	18,5	2,54	116,1	11,22	5,14	60,25	30,05	3,27
0,99	193,13	29,89	10,79	49,37	15,59	1,81	212,69	79,83	10,82	285,17	32,94	26,56

## Приложение 7. Энергия активации при различных степенях конверсии

BOS 80

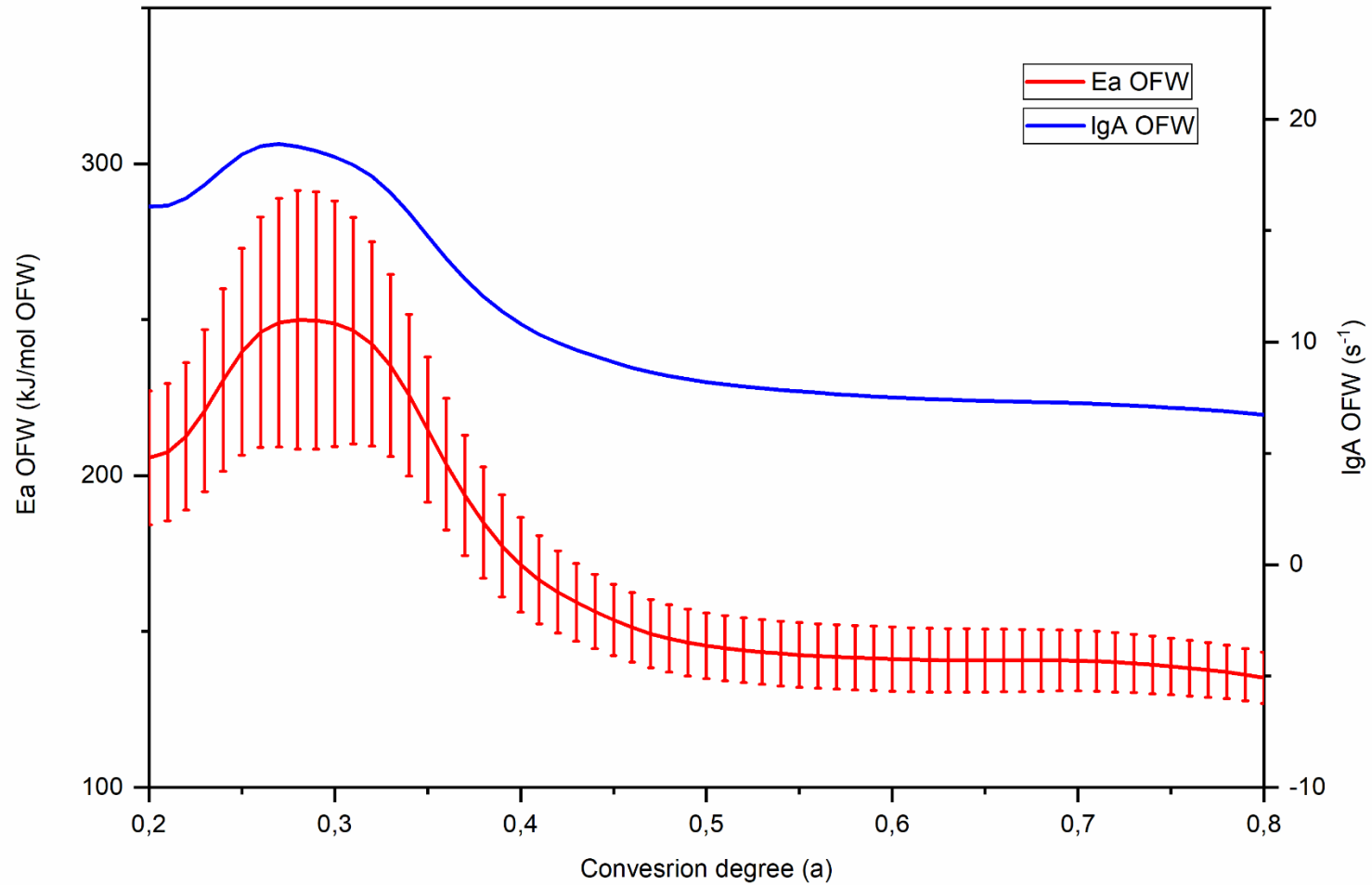


Рис. 7.1 Энергия активации при различных степенях конверсии изоляции BOS 80



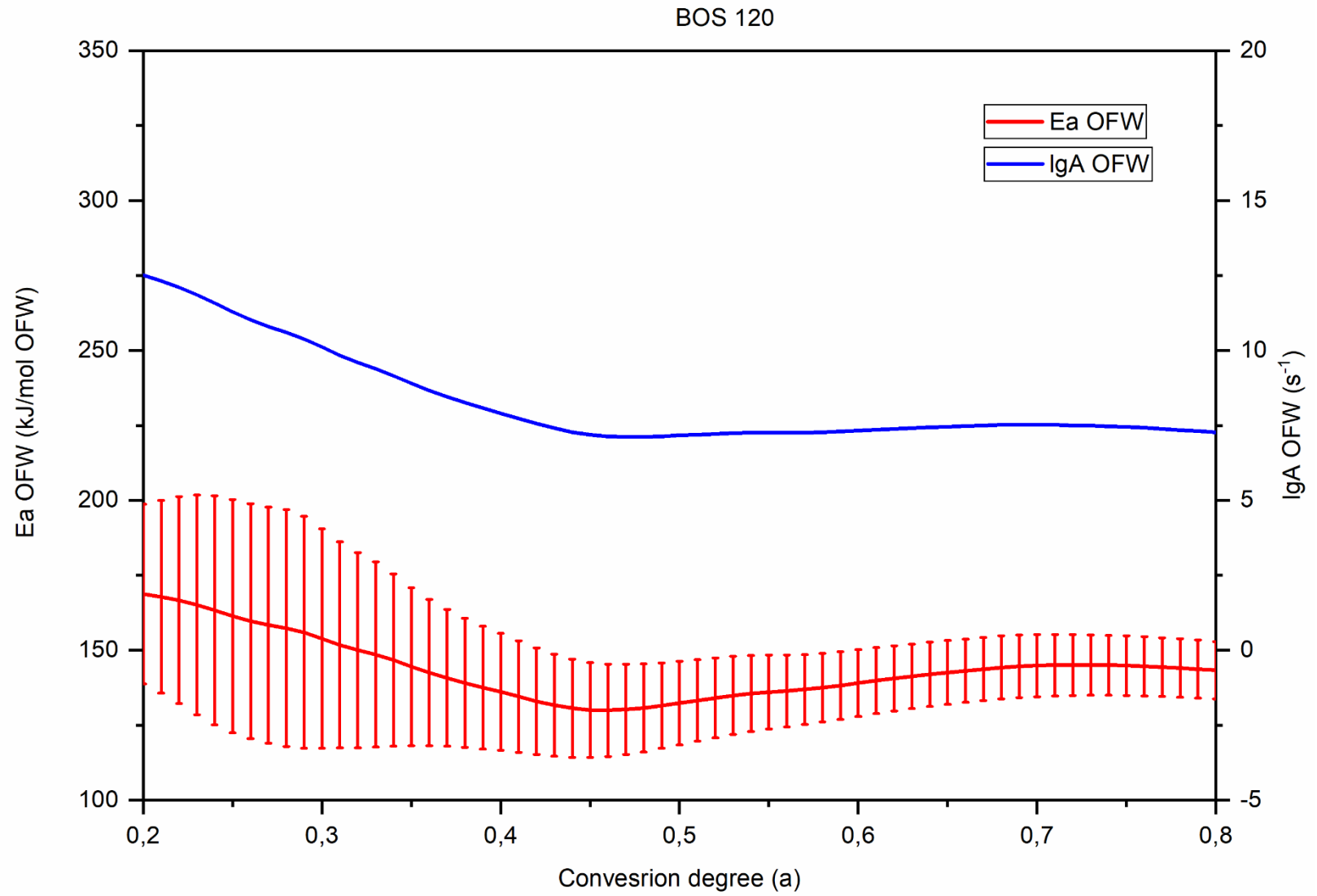


Рис.7.2 Энергия активации при различных степенях конверсии изоляции BOS 120

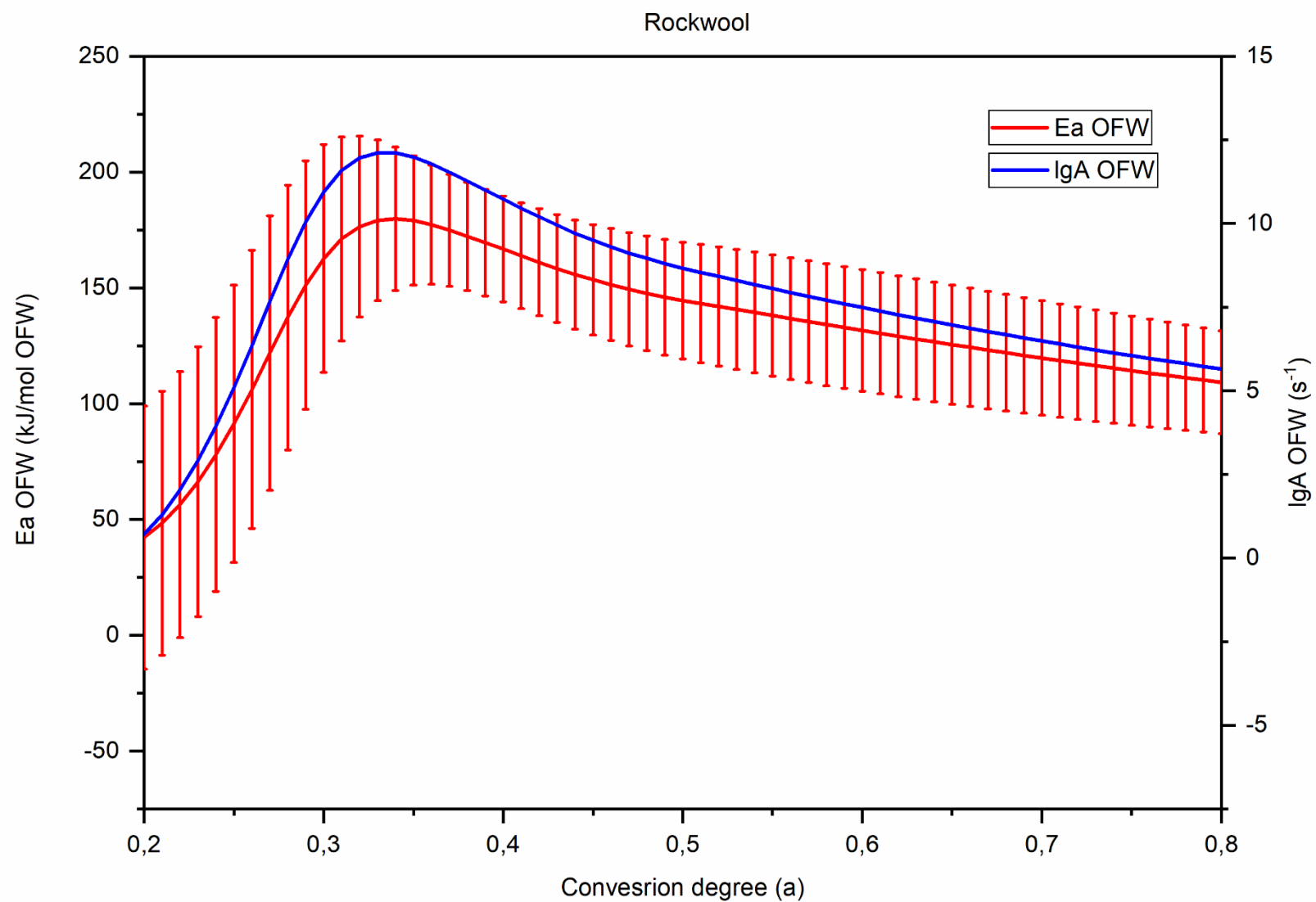


Рис. 7.3 Энергия активации при различных степенях конверсии изоляции Rockwool

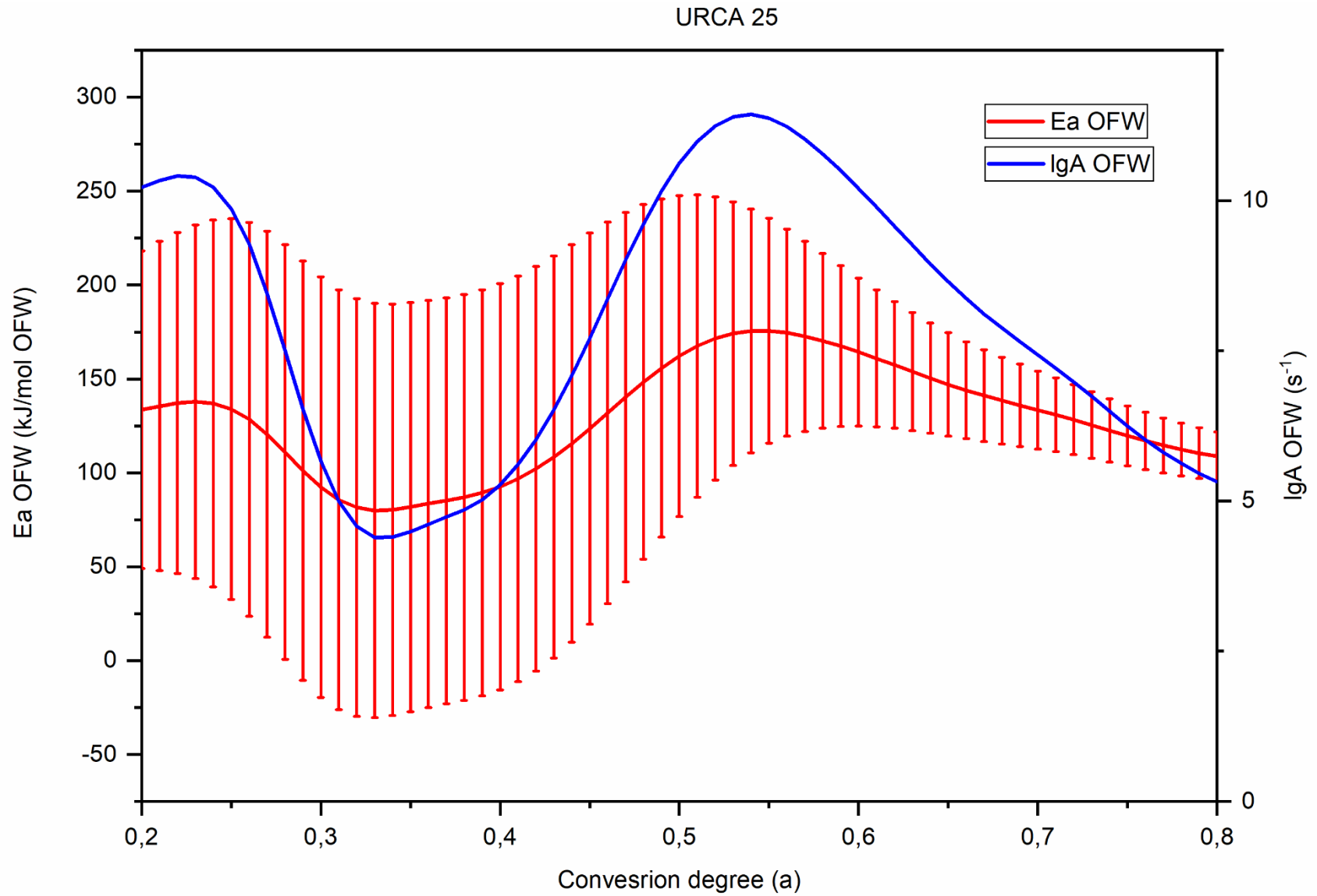


Рис. 7.4 Энергия активации при различных степенях конверсии изоляции URSA M-25

## Приложение 8. Результаты расчета термической устойчивости для исследуемых материалов

Таблица 8.1 Результаты расчета термической устойчивости (время жизни материала до полного разложения полимерного связующего) по методу, представленному в ГОСТ Р 57946-2017

$T, ^\circ\text{C}$	BOS 80	BOS 100	BOS 120	Экоролл	Форвард	URSA
	$t_f, \text{ч}$	$t_f, \text{ч}$	$t_f, \text{ч}$	$t_f, \text{ч}$	$t_f, \text{ч}$	$t_f, \text{ч}$
400	7	11	8	10	3	2
390	10	16	11	15	4	3
380	14	25	16	22	5	4
370	21	37	23	34	8	6
360	31	58	34	53	13	8
350	46	91	52	83	20	11
340	71	145	79	132	31	15
330	111	234	122	213	49	22
320	175	385	193	351	79	31
310	280	643	307	586	130	45
300	457	1095	499	996	217	66
290	759	1900	824	1727	370	98
280	1282	3362	1386	3053	643	147
270	2210	6077	2376	5512	1141	225
260	3885	11230	4156	10176	2067	350
250	6981	21244	7428	19231	3832	554
240	12835	41200	13577	37258	7275	892
230	24173	82036	25420	74106	14169	1463
220	46713	167974	48819	151568	28354	2448

## Приложение 9. Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
о государственной регистрации программы для ЭВМ  
**№ 2022663721**

**Программа расчета долговечности теплоизоляционных материалов из данных термогравиметрии разложения**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» (RU)*

Авторы: *Батукова Эльвира Раисовна (RU), Ваньков Юрий Витальевич (RU), Емельянов Дмитрий Анатольевич (RU), Ахметова Ирина Гареевна (RU), Абдуллин Тимурбулат Радырович (RU)*

Заявка № **2022662939**  
Дата поступления **04 июля 2022 г.**  
Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **19 июля 2022 г.**



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Ю.С. Лубов*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022660400

**Программа расчета срока службы и предельной температуры применения теплоизоляционных материалов из данных термогравиметрии разложения**

Приниматель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» (RU)*

Авторы: *Батукова Эльвира Раисовна (RU), Ваньков Юрий Витальевич (RU), Емельянов Дмитрий Анатольевич (RU), Ахметова Ирина Гареевна (RU), Абдуллин Тимурбулат Раширович (RU)*

Заявка № 2022619121

Дата поступления 23 мая 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Регистре программ для ЭВМ 03 июня 2022 г.



*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

Федеральная служба по интеллектуальной собственности  
Роспатент  
125009, Москва, Мясницкая улица, дом 26А  
www.fips.gov.ru

Ю.С. Зубов