

На правах рукописи

Скобелкина Татьяна Николаевна

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ДИАГНОСТИКА  
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
БЫСТРОСЪЕМНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ  
МНОГОРАЗОВОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ АТОМНЫХ  
СТАНЦИЙ С РЕАКТОРОМ ВВЭР

Специальность 05.14.03 – «Ядерные энергетические  
установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из  
эксплуатации»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2007

Работа выполнена в филиале ФГУП «ИСК «Росатомстрой» - НИКИМТ в научно-исследовательском и конструкторско-технологическом отделе неметаллических и теплоизоляционных материалов

Научный руководитель: кандидат технических наук, с.н.с.  
Юрченко Виктор Григорьевич

Научный консультант: кандидат технических наук, доцент  
Харитонов Владимир Степанович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, с.н.с.  
Приймак Степан Владимирович

кандидат технических наук, с.н.с.  
Бессонов Игорь Вячеславович

Ведущая организация: ФГУП «Научно-исследовательский  
проектно-конструкторский и  
изыскательский институт  
«Атомэнергопроект»

Защита состоится «26» сентября 2007 года в 16 час. 30 мин. на заседании диссертационного совет Д 212.130.04 при Московском инженерно – физическом институте (государственном университете) по адресу: 115409, Москва, Каширское ш., 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского инженерно-физического института (государственного университета).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д. ф.-м. н., профессор



Е.М. Кудрявцев

теплоизоляционных материалов с целью их применения в быстросъемных теплоизоляционных изделиях. Сборник научных трудов научной сессии МИФИ-2004, Москва, т.8, - с.201.

8. Скобелкина Т.Н., Большаков В.И., Харитонов В.С., Юрченко В.Г. Стендовые испытания быстросъемной мягкой теплоизоляции.// Сборник научных трудов научной сессии МИФИ-2006, Москва, т.8 – с.148-149.

9. Скобелкина Т.Н., Большаков В.И., Харитонов В.С., Юрченко В.Г. Моделирование и измерение теплофизических характеристик быстросъемной теплоизоляции.//Сборник научных трудов научной сессии МИФИ-2007, Москва, т.8 – с.63.

10. Блочная съемная тепловая изоляция оборудования и трубопроводов атомных станций. Методики определения температуры поверхности и плотности теплового потока. (РД 09.044 - 2006 ) М., 2006 (Филиал ФГУП «ИСК «Росатомстрой» –НИКИМТ) - 18 с.

11. Скобелкина Т.Н., Юрченко В.Г., Васильев Д.Б. О результатах обследования состояния теплоизоляции в «горячих» помещениях АЭС с реактором РБМК.// Пятая международная научно-техническая конференция. Безопасность эффективность и экономика атомной энергетики. Пленарные и секционные доклады. – М.: концерн «Росэнергоатом», 2006. – с.247 – 250.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Тепловая изоляция является неотъемлемой частью практически всего оборудования и трубопроводов АЭС. Срок службы тепловой изоляции зависит от места ее применения на АЭС и от воздействия эксплуатационных факторов, таких как ионизирующее излучение, высокая температура, вибрация, воздействие паровоздушной среды. Как показывает статистика, при выполнении регламентных работ тепловая изоляция каждого энергоблока АЭС ежегодно заменяется на 20-25%. Для использованной изоляции, особенно той, которая находилась в необслуживаемых (или периодически обслуживаемых) помещениях, необходимы наличие и подготовка «мест захоронения», что требует дополнительных ежегодных затрат. Поэтому с целью сокращения нарастающего объема слаборадиоактивных теплоизоляционных отходов разрабатывается быстросъемная тепловая изоляция многократного использования (далее быстросъемная теплоизоляция, БСТИ), дополнительным преимуществом которой является возможность оперативного освобождения контролируемых участков оборудования и трубопроводов.

Таким образом, проектирование и разработка быстросъемной теплоизоляции для АЭС, а также исследование ее теплофизических и эксплуатационных свойств является сегодня актуальной задачей.

Создание теплоизоляционных конструкций идет, в основном, по методикам, полученным на основе эмпирических соотношений. При разработке новых конструкций теплоизоляции требуется создание научно-обоснованной методики расчета, основанной на реальной структуре теплоизоляционного материала. Поэтому для разработки образцов теплоизоляции и прогнозирования их эксплуатационных характеристик необходимо развитие методов моделирования теплофизических процессов, протекающих в теплоизоляционных материалах и конструкциях.

**Цель работы** – разработка методики расчета теплопроводности волокнистых материалов и быстросъемной теплоизоляции из них для решения задач, связанных с обоснованием выбора конструкции и прогнозирования теплофизических характеристик БСТИ для оборудования и трубопроводов АЭС с реактором ВВЭР.

Для достижения поставленной цели предполагается решить основные **задачи**:

1. изучить степень пригодности существующих физико-математических моделей сложного теплообмена теплоизоляционных материалов и конструкций к определению эффективного коэффициента теплопроводности волокнистых материалов и быстросъемной теплоизоляции эксплуатируемой на АЭС с реактором ВВЭР;

2. разработать методику расчета теплопроводности БСТИ и волокнистых теплоизоляционных материалов, позволяющую оценить изменение теплофизических характеристик в зависимости от структуры теплоизоляционного материала и эксплуатационных факторов АЭС.

3. произвести по разработанной методике расчет коэффициента теплопроводности разрабатываемой быстросъемной мягкой теплоизоляции;

4. поставить и провести экспериментальные исследования по определению теплотехнических характеристик образцов быстросъемной теплоизоляции и волокнистых теплоизоляционных материалов с учетом условий эксплуатации АЭС;

5. провести оптимизацию характеристик теплоизоляционного слоя и обоснование выбора конструкции быстросъемной теплоизоляции для трубопроводов и оборудования АЭС с реактором ВВЭР.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. разработана методика расчета теплопроводности волокнистых материалов, основанная на реальной структуре, с учетом взаимодействия различных механизмов переноса тепла, и быстросъемной теплоизоляции из них;

2. впервые получены экспериментальные данные изменения основных технических характеристик волокнистых теплоизоляционных материалов, широко используемых в атомной энергетике, после эксплуатации в условиях АЭС в течение двадцати лет;

3. впервые в отечественной практике на основе результатов расчетных и экспериментальных исследований проведена оптимизация характеристик теплоизоляционного слоя быстросъемной теплоизоляции и разработана быстросъемная мягкая теплоизоляция

базальтовых волокон показали что, при воздействии радиационного излучения до 0,43 МГр значения плотности, сжимаемости, упругости, диаметра волокон и коэффициента теплопроводности практически постоянны.

8. На основе результатов расчетных исследований проведена оптимизация характеристик теплоизоляционного слоя быстросъемной теплоизоляции. На базе полученных результатов экспериментальных и расчетных исследований разработана быстросъемная теплоизоляция многоразового использования для питательного насоса и участков трубопровода АЭС с реактором ВВЭР.

Осуществлено изготовление и установка разработанных образцов быстросъемной теплоизоляции многоразового использования на Нововоронежской АЭС.

#### **Опубликованные работы по теме диссертации**

1. Скобелкина Т.Н., Большаков В.И., Харитонов В.С., Юрченко В.Г. Коэффициент теплопроводности быстросъемной теплоизоляции. //Атомная энергия т. 99 вып.3, сентябрь 2005. – с. 236 – 238.

2. Скобелкина Т.Н., Большаков В.И., Харитонов В.С., Юрченко В.Г. Оптимизация характеристик теплоизоляционного слоя быстросъемной изоляции многоразового использования для АЭС с ВВЭР. //Атомная энергия т.101, Вып.3, сентябрь 2006. – с.203 - 208.

3. Скобелкина Т.Н., Пышнова В.В., Юрченко В.Г., и др. Оценка влияния раствора борной кислоты и температуры на теплоизоляционный материал из базальтовых волокон. //Атомная энергия т.101, Вып.6, 2006.- с. 455 – 460.

4. Скобелкина Т.Н. Тепловая изоляция нового поколения. //Естественные и технические науки № 3 (12) 2004. – с. 185-186.

5. Скобелкина Т.Н., Большаков В.И., Кудрова Л.Г., Понаморов В.А. Инфракрасный метод контроля за состоянием волокон в быстросъемной многоразовой теплоизоляции для АЭС. Сборник научных трудов научной сессии МИФИ-2004, т.8 - с. 199-200.

6. Скобелкина Т.Н., Большаков В.И., Пышнова В.В., Харитонов В.С., Юрченко В.Г. Оценка эффективного коэффициента теплопроводности волокнистых теплоизоляционных материалов, применяемых в быстросъемных теплоизоляционных изделиях. Сборник научных трудов научной сессии МИФИ-2005, Москва, т.8 - с.120.

7. Скобелкина Т.Н., Большаков В.И., Харитонов В.С., Юрченко В.Г. Экспериментальные исследования свойств волокнистых

2. Проведены расчетные исследования изменения теплопроводности, по разработанной методике, для теплоизоляционных материалов из базальтовых волокон плотностью от 50 до 400 кг/м<sup>3</sup>, средним диаметром волокон от 1 до 18 мкм работающих при температуре от 100 до 450 °С, и для быстросъемной мягкой теплоизоляции с двух-, трех-, четырех-слойным исполнением клапана из стеклянных, базальтовых, полиарамидных тканей и материала термостойкого облицовочного «Атом». Полученные результаты могут использоваться при моделировании теплоизоляционных конструкций.

3. Разработана комплексная методика экспериментального определения теплоизоляционных свойств быстросъемной мягкой теплоизоляции многоразового использования в условиях лаборатории и эксплуатации.

4. Впервые в отечественной практике получены экспериментальные данные теплофизических характеристик образцов БМТИ цилиндрической формы, работающих в условиях эксплуатации ( $t = 135-180 \pm 5$  °С; вибрация с частотой от 0 до 100 Гц и амплитудой от 0,02 до 0,01 мм) в течение 386 сут ( $\lambda = 0,031-0,032 \pm 0,0035$  Вт/(м °С);  $t_{\text{поверх}} = 26-36 \pm 5$  °С).

5. Впервые изъяты и обследованы образцы теплоизоляционного материала, проработавшие в условиях эксплуатации в течение двадцати лет ( $t = 150 - 260 \pm 5$  °С; радиационное излучение с интегральной дозой не более 0,2 МГр). Проведенные испытания показали, что: плотность материала уменьшилась на  $\approx 26\%$ ; сжимаемость увеличилась; изменение диаметра волокон лежит в пределах погрешности; теплопроводность уменьшилась на  $\approx 20\%$ .

6. Проведены испытания по оценке влияния одновременного воздействия среды (раствора борной кислоты) и температуры (до 50°С) на основные технические характеристики теплоизоляционных материалов из базальтовых волокон, которые показали, что у образцов прошедших испытания, отмытых от раствора и высушенных, основные значения технических характеристик значительно не изменяются, а у образцов прошедших испытания, и высушенных в растворе наблюдаются изменения технических характеристик.

7. Результаты исследования влияния радиационного излучения на теплотехнические характеристики теплоизоляционного материала из

многоразового использования для питательного насоса и участков трубопровода АЭС с реактором ВВЭР.

#### **Практическая значимость работы:**

1. разработана и предложена методика расчета теплопроводности волокнистых теплоизоляционных материалов, позволяющая оптимизировать теплоизоляционный слой быстросъемной теплоизоляции для оборудования и трубопроводов АЭС, а также прогнозировать изменение коэффициента теплопроводности при изменении таких характеристик материала как плотность, средний диаметр волокон и температуры эксплуатации. Методика может применяться как при проектировании теплоизоляционных конструкций и изделий, так и при прогнозировании надежности волокнистых теплоизоляционных материалов;

2. разработана комплексная методика экспериментального определения теплоизоляционных свойств быстросъемной теплоизоляции многоразового использования в условиях лаборатории и эксплуатации. По разработанной методике проведены исследования образцов быстросъемной теплоизоляции волокнистых теплоизоляционных материалов, используемых на АЭС Российской Федерации. Получены экспериментальные данные для вновь разработанных конструкций быстросъемной теплоизоляции, широкое использование которых предполагается на АЭС.

#### **Реализация результатов:**

1. акт внедрения Департамента по техническому обслуживанию и ремонту АЭС концерна «Росэнергоатом»;

2. результаты работы были использованы в проектной практике филиала ФГУП «ИСК «Росатомстрой» - НИКИМТ при проектировании быстросъемной теплоизоляции для участков трубопровода, насоса ПТ 3750-75 и пояса ТЭНов. Разработанные изделия успешно эксплуатируются на АЭС с реактором ВВЭР -1000 (Нововоронежской и Калининской АЭС).

#### **На защиту выносятся:**

1. методика расчета теплопроводности волокнистых материалов и быстросъемной теплоизоляции;

2. результаты расчетных и экспериментальных исследований по определению коэффициента теплопроводности быстросъемной теплоизоляции и волокнистых материалов при изменении таких характеристик материала как плотность, средний диаметр волокон и температуры эксплуатации;

3. результаты экспериментальных исследований по оценке влияния эксплуатационных факторов АЭС на технические характеристики волокнистых теплоизоляционных материалов и быстрорасъемной теплоизоляции.

**Достоверность полученных в работе результатов** и выводов подтверждена сравнением результатов расчетов с полученными экспериментальными данными и результатами других исследователей.

**Апробация работы.** Основные результаты работы доложены на научных сессиях Московского инженерно-физического института (государственного университета) в 2004-2007гг.; на совместном заседании секции № 4 научно-технического совета № 1 Росатома и научно-технического совета концерна «Росэнергоатом», г. Москва, 2005г.; на пятой международной научно-технической конференции «Безопасность эффективность и экономика атомной энергетики», г. Москва, 2006г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ и выпущен один руководящий документ.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 123 наименований, и 3 приложения. Работа изложена на 127 страницах машинописного текста, содержит 33 рисунка и 13 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность работы, определены цели и задачи исследования, сформулированы основные положения и результаты исследований, выносимые на защиту.

В **первой главе** на основе анализа научно-технической литературы по вопросам разработки и изготовления теплоизоляционных конструкций, а также отечественного и зарубежного опыта по производству быстрорасъемной теплоизоляции для трубопроводов и оборудования АЭС установлена целесообразность проектирования быстрорасъемной теплоизоляции для оборудования сложной геометрии, и необходимость проведения

кислоты и температуры в течение 30 сут) на образцы теплоизоляционного материала из базальтовых волокон и быстрорасъемной теплоизоляции из них проведено обоснование выбора конструкции быстрорасъемной мягкой теплоизоляции.

На основе полученных результатов при проведении моделирования быстрорасъемной теплоизоляции, оптимизации характеристик теплоизоляционного слоя, обоснования выбора конструкции были разработаны, изготовлены и установлены на АЭС образцы БМТИ для участков трубопровода Ø 108мм и для питательного насоса ПТ 3750-75 (рисунок 6).



а)



б)

Рисунок 6 - Быстрорасъемная мягкая теплоизоляция многоцветного использования для участков трубопроводов АЭС а) и для насоса питательного ПТ 3750-75 б)

В **заключении** диссертации сформулированы основные результаты проведенных исследований, а также показана практическая полезность проделанной работы.

### Основные результаты работы:

1. На основе существующих моделей теплопередачи в теплоизоляционных материалах и конструкциях, разработана методика расчета теплопроводности волокнистых материалов и быстрорасъемной мягкой теплоизоляции. Адекватность методики подтверждена сравнением результатов расчетов с полученными экспериментальными данными и опубликованными в литературе.

базальтовых волокон, результаты которых (таблица 4) позволяют заключить, что теплотехнические характеристики образцов показывают практическое постоянство значений до дозы 0,45 МГр.

Т а б л и ц а 4 – Теплотехнические характеристики облученного теплоизоляционного материала из базальтовых волокон

Доза облучения, МГр	$\lambda$ , при температуре $22 \pm 5$ °С и плотности $100 \pm 5$ кг/м <sup>3</sup> , Вт/(м °С)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$d$ , мкм	Упругость %	Сжимаемость, %
Не облученный	0,034	85	3,0	96,4	27,42
0,03	0,034	86	3,0	96	27
0,1	0,035	86	3,1	96,2	27,2
0,45	0,035	86	3,1	96	27,2

**Четвертая глава** посвящена оптимизации характеристик теплоизоляционного слоя и обоснованию выбора конструкции быстросъемной мягкой теплоизоляции на основании полученных результатов расчетных и экспериментальных исследований в диссертационной работе.

Основным показателем, определяющим теплотехнические свойства быстросъемной изоляции многоуровневого использования, является теплопроводность теплоизоляционного слоя, которая зависит от температуры изолируемой поверхности и окружающей среды, плотности материала, диаметра волокна. Очевидно, что при заданных исходных условиях – температурном режиме эксплуатации и нормативной плотности теплового потока – необходимо выбрать такое сочетание всех остальных факторов, при которых теплопроводность была бы минимальной. Результаты оптимизации, выполненной численным способом с помощью разработанной методики расчета коэффициента теплопроводности для волокнистых материалов, расположенных в помещениях при температуре изолируемой поверхности от 100 до 350 °С и диаметрах волокон от 1,5 до 15 мкм, приведены в данной главе.

На основании полученных экспериментальных данных и накопленного опыта других исследователей, о влиянии эксплуатационных факторов (высокой температуры, радиационного излучения, вибрации, совместного воздействия раствора борной

моделирования и диагностики теплотехнических характеристик разрабатываемых теплоизоляционных изделий.

На основе анализа существующих моделей и расчетных методов определения теплофизических характеристик теплоизоляции выбраны и обоснованы наиболее применимые к конструктивным особенностям быстросъемной теплоизоляции.

В работе показано, что задача разработки быстросъемной теплоизоляции для трубопроводов и оборудования АЭС является сложной и многофакторной и не может быть решена с помощью существующих знаний о влиянии эксплуатационных факторов. Для решения этой задачи необходимо проведение экспериментальных исследований по оценке влияния таких эксплуатационных факторов, как высокая температура, вибрация, радиационное излучение и раствора борной кислоты (в случае аварийных ситуаций на АЭС).

На основании обзора и анализа информации сформулированы цель и задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена разработке методики расчета теплопроводности быстросъемной теплоизоляции с теплоизоляционным слоем, выполненным из базальтовых волокон.

Эффективный коэффициент теплопроводности волокнистой теплоизоляции определялся, при рассмотрении теплопереноса в элементарной ячейке в виде параллелепипеда, по одной из диагоналей которого расположено волокно, касающееся соседних волокон в вершинах параллелепипеда (рисунок 1). При этом полагалось, что: содержание твердой фазы в ячейке равно ее средней концентрации; тепловой поток, который проходит через ячейку, перпендикулярен одной из сторон параллелепипеда; передача тепла через элементарную ячейку осуществляется тремя механизмами: теплообмен излучением, передача тепла через твердую фазу и газ-наполнитель за счет теплопроводности, и конвективный теплообмен. Для определения лучистой составляющей теплового потока использовалось уравнение диффузии излучения, в котором учитывалось неравновесность падающего и собственного излучения. Коэффициент теплопроводности твердой фазы определялся из решения уравнения теплопроводности для волокна, расположенного в элементарной ячейке, с учетом теплообмена с окружающей средой излучением через газ и соседние волокна.

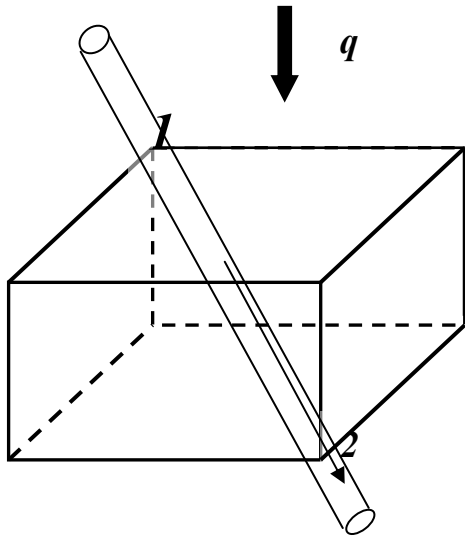


Рисунок 1 - Схема элементарной ячейки

В результате эффективный коэффициент теплопроводности волокнистой теплоизоляции (без учета конвекции) рассчитывался по формуле:

$$\lambda_{эф}^* = \lambda_{л} + \lambda_{г} + \lambda_{к},$$

где  $\lambda_{л}, \lambda_{г}, \lambda_{к}$  - лучистая, газовая и контактная составляющие коэффициента теплопроводности.

Лучистая составляющая коэффициента теплопроводности

$$\lambda_{л} = \frac{64}{3} \sigma T^3 \frac{d}{C_T} \left( \frac{15}{4} \varepsilon + \frac{61}{12} R_d + 3R_s \right)^{-1},$$

где  $\sigma$  - постоянная Стефана - Больцмана;  $R_d, R_s$  - диффузный и зеркальный коэффициенты отражения;  $d$  - диаметр волокна;  $C_T$  -

- по истечении 15 сут: у образцов, высушенных в растворе, увеличилась плотность на 44 %, сжимаемость уменьшилась на 36,6 %, изменение упругости лежит в пределах погрешности, теплопроводность увеличилась на 4,7 %; у образцов, отмытых от раствора и высушенных, плотность лежит в пределах погрешности, сжимаемость уменьшилась на 19%, изменение упругости лежит в пределах погрешности, диаметр волокон увеличился на 12,5 % значение теплопроводности не изменилось;

- по истечении 30 сут: у образцов, высушенных в растворе, плотность увеличилась на 57,8 %, сжимаемость уменьшилась на 48,5 %, изменение упругости лежит в пределах погрешности, теплопроводность увеличилась на 7 %; у образцов, отмытых от раствора и высушенных, плотность лежит в пределах погрешности, сжимаемость уменьшилась на 17,2 %, изменение упругости лежит в пределах погрешности, диаметр волокон увеличился на 12,5%, значение теплопроводности осталось неизменным.

Впервые проведены экспериментальные исследования по определению фактического состояния теплоизоляционных материалов после эксплуатации ( $t = 150 - 260 \pm 5$  °С; радиационное излучение с интегральной дозой не более 0,2 МГр) в течение двадцати лет на АЭС (таблица 3), по результатам которых можно сделать вывод, что: плотность материала уменьшилась на  $\approx 26\%$ ; сжимаемость увеличилась; изменение диаметра волокон лежит в пределах погрешности; теплопроводность уменьшилась на  $\approx 20\%$ .

Т а б л и ц а 3 – Результаты испытаний по определению фактического состояния теплоизоляционного материала после эксплуатации в течение двадцати лет на АЭС

Характеристика	Исходное значение	Через 20 лет
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	125	от 72 до 112
Сжимаемость, %	12	от 15,4 до 40
Упругость, %	Нет данных	от 88 до 100
Ср. диаметр волокон, мкм	12	от 10,3 до 11,6
Теплопроводность при 25 °С, Вт/(м К)	0,049	от 0,035 до 0,039

Проведены исследования влияния радиационного излучения на теплотехнические характеристики теплоизоляционного материала из



В данной главе приведены экспериментальные результаты определения теплотехнических характеристик: 1) образцов быстросъемной мягкой теплоизоляции плоской и цилиндрической формы на стендах одностороннего нагрева; 2) образцов теплоизоляционного материала из базальтовых и стеклянных волокон на плоском стенде одностороннего нагрева, а также на измерителе теплопроводности ИТП-МГ-100.

Впервые получены экспериментальные данные изменения теплотехнических характеристик быстросъемной мягкой теплоизоляции в условиях эксплуатации ( $t = 135-180 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; вибрация с частотой от 0 до 100 Гц и амплитудой от 0,02 до 0,01 мм) на АЭС с ВВЭР (таблица 2).

Т а б л и ц а 2 - Результаты эксплуатационных испытаний образцов быстросъемной мягкой теплоизоляции

№ обр.	$t_n, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_b, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{cp}, \text{ }^\circ\text{C}$	$q, \text{ Вт/м}^2$	$\lambda_{экс}, \text{ Вт/(м К)}$
Исходные данные					
1	180	35	107,5	57	0,031
2	180	34	107	58	0,032
69 сут					
1	180	35	107,5	57	0,031
2	180	34	107	58	0,032
127 сут					
1	180	35	107,5	57	0,031
2	180	34	107	58	0,032
168 сут					
1	135	26	80,2	45	0,033
2	135	26	80,2	44	0,032
386 сут					
1	180	35	107,5	59	0,032
2	180	35,5	107,75	59	0,032

Проведены испытания по оценке влияния одновременного воздействия среды (раствора борной кислоты) и температуры (до  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) на основные технические характеристики теплоизоляционных материалов из базальтовых волокон, результаты которых позволили сделать следующие выводы:

концентрация твердого вещества в единице объема;  $T$  - температура;  $\varepsilon$  - степень черноты волокна.

Газовая составляющая коэффициента теплопроводности

$$\lambda_g = \lambda^g (1 - C_T) \left\{ 1 + C_T (1 - C_T) \left( \frac{61}{32d} - \frac{a}{2d} \right) \mu \sqrt{\frac{\pi}{2} R_g T} \right\},$$

где  $a$  - коэффициент аккомодации газа на поверхности волокна;  $\mu$  - динамическая вязкость газа;  $R_g$  - газовая постоянная;  $\lambda^g$  - коэффициент теплопроводности газа - наполнителя.

Контактная составляющая коэффициента теплопроводности

$$\lambda_T = 0,5 \lambda_B C_T \left\{ 1 - \frac{1}{\frac{shM}{N} + chM} \right\},$$

где  $\lambda_B$  - коэффициент теплопроводности волокна;  $M = 2^{0,25} \sqrt{\frac{\pi \alpha d}{\lambda_B C_T}}$ ;

$N = 24,65 \pi \sqrt{\frac{d \alpha}{\lambda_B}}$ . Здесь  $\alpha$  - суммарный коэффициент теплоотдачи,

который рассчитывался по формуле

$$\alpha = \frac{\alpha_c \alpha'_k}{\alpha_c + \alpha'_k} + \alpha_l,$$

где  $\alpha_c = 0,267 \left( \frac{c_v}{R_g} \right) p a \sqrt{\frac{R_g}{T}}$  - коэффициент теплоотдачи для разреженного газа;

$\alpha'_k = \frac{2 \lambda^g}{d \ln(\sqrt{C_T})^{-1}}$  - коэффициент теплоотдачи для

плотного газа;  $\alpha_l = 4 \varepsilon \sigma T^3$  - коэффициент теплоотдачи излучением.

Влияние естественной конвекции в волокнистой теплоизоляции учитывалось по соотношениям, из решения уравнения конвективной теплопроводности, дополненного уравнением стационарного движения газа, с учетом силы объемного сопротивления при обтекании твердых элементов, по формуле

$$\frac{\lambda_{\text{эф}}}{\lambda_{\text{эф}}^*} \left( \frac{\lambda_{\text{эф}}}{\lambda_{\text{эф}}^*} - 1 \right) \left( \frac{\lambda_{\text{эф}}}{\lambda_{\text{эф}}^*} - \frac{1}{2} \right)^2 = \left( \frac{Ra^*}{32} \right)^2,$$

где  $\lambda_{\text{эф}}$  - эффективный коэффициент теплопроводности изоляции;  $\lambda_{\text{эф}}^*$  - эффективный коэффициент теплопроводности изоляции при отсутствии естественной конвекции;  $Ra^* = \beta g L d^2 \gamma \left( \frac{\Delta T}{\nu a^*} \right)$  - фильтрационное число Рэлея,  $\gamma$  - безразмерный коэффициент газопроницаемости,  $a^*$  - коэффициент температуропроводности газа - наполнителя.

Для волокнистых материалов при обтекании хаотически расположенных волокон коэффициент газопроницаемости определялся по формуле

$$\gamma = \frac{2}{3} \gamma_{\perp} + \frac{1}{3} \gamma_{\parallel},$$

где  $\gamma_{\perp}$ ,  $\gamma_{\parallel}$  - коэффициент газопроницаемости при поперечном и продольном обтекании газом, соответственно рассчитываемые по формулам

$$\gamma_{\perp} = \frac{1}{32 C_T} \left[ \ln \frac{1}{C_T} - \frac{1 - C_T^2}{1 + C_T^2} \right],$$

$$\gamma_{\parallel} = \frac{1}{16 C_T} \left[ \ln \frac{1}{C_T} - \frac{1}{2} (1 - C_T) (3 - C_T) \right].$$

Моделирование в работе проводилось для модулей конструкции быстросъемной теплоизоляции, представляющий собой теплоизоляционный слой, закрытый защитным тканевым кожухом, то есть модулей быстросъемной мягкой теплоизоляции (БМТИ).

Модуль БМТИ огибаемый объект, крепится с помощью ремней и застежек, расположенных на противоположных сторонах (для простых конструкций) или на других модулях (для конструкций на оборудование сложной формы). Таким образом, образуется зазор между модулями, а между БМТИ и изолируемым объектом зазор отсутствует в силу плотного прилегания мягкой теплоизоляции. При моделировании коэффициент теплопроводности модуля (без учета

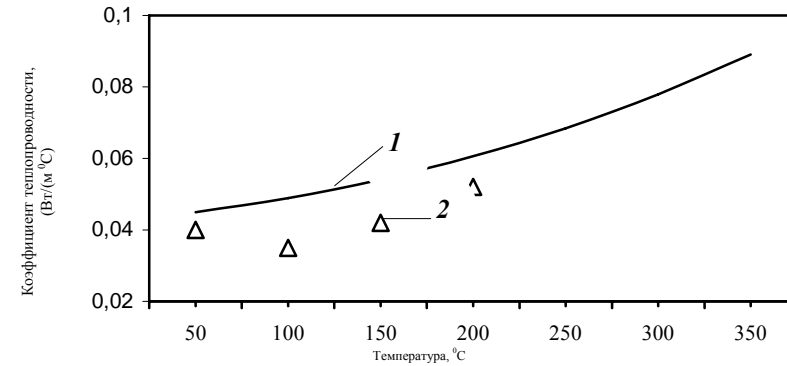


Рисунок 5 – Расчетная (1) и экспериментальная (2) зависимость коэффициента теплопроводности БМТИ от температуры

Таким образом, разработана методика расчета эффективного коэффициента теплопроводности теплоизоляции, которая учитывает температуру эксплуатации, плотность теплоизоляции, диаметр волокон, свойства газа - наполнителя и теплопроводность материала волокон.

**Третья глава** посвящена экспериментальным исследованиям теплотехнических характеристик быстросъемной теплоизоляции и теплоизоляционных волокнистых материалов. С целью получения зависимости изменения теплотехнических характеристик от воздействия эксплуатационных факторов на образцы быстросъемной теплоизоляции и волокнистые материалы разработана комплексная методика испытаний, включающая в себя лабораторные и эксплуатационные испытания. При проведении испытаний определились следующие характеристики: 1) для образцов теплоизоляционных материалов - плотность, упругость, сжимаемость, диаметр волокон, теплопроводность; 2) для образцов быстросъемной теплоизоляции – тепловой поток с поверхности, температура поверхности, коэффициент теплопроводности, геометрические размеры. В данной главе описываются используемые методы определения теплотехнических характеристик и методика обработки полученных результатов исследований.

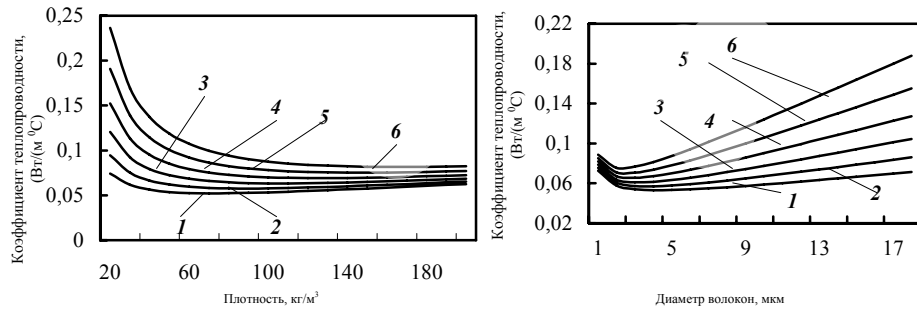


Рисунок 4 – Расчетные кривые зависимости теплопроводности теплоизоляционного слоя из базальтовых волокон от: а) плотности материала при  $d = 5$  мкм и температуре 100 (1), 150 (2), 200 (3), 250 (4), 300(5), 350<sup>0</sup>С(6); б) среднего диаметра при плотности 100 кг/м<sup>3</sup>, температуре 100 (1), 150 (2), 200 (3), 250 (4), 300 (5), 350<sup>0</sup>С (6)

В данной главе для подтверждения адекватности модели теплопередачи в БМТИ были проведены тестовые расчеты и сопоставлены с экспериментальными данными, полученными в главе 3 диссертационной работе (рисунок 5). Также по предложенной модели клапана быстросъемной мягкой теплоизоляции проведены расчеты для двух-, трех-, четырехслойного исполнения клапана из стеклянных, базальтовых, полиарамидных тканей и материала термостойкого облицовочного «Атом». Коэффициенты теплопроводности при температуре эксплуатации от 100 до 300<sup>0</sup>С лежат в диапазоне: от 0,0434 до 0,0590 - для двухслойных клапанов; от 0,0432 до 0,0583 Вт/(м<sup>0</sup>С) - для трехслойных клапанов; от 0,0432 до 0,0580 Вт/(м<sup>0</sup>С) - для четырехслойных клапанов. Значения коэффициентов теплопроводности всех трех исполнений конструкции стыка БМТИ не превышают значений теплопроводности, полученных для теплоизоляционного слоя. Поэтому за теплопроводность конструкции быстросъемной теплоизоляции принималось расчетной значение теплопроводности теплоизоляционного слоя.

участка стыка) полагается равным коэффициенту теплопроводности теплоизоляционного слоя. Зазор между модулями БМТИ, который накрывается клапаном из ткани в четыре слоя, представлен в разрезе на рисунке 2.

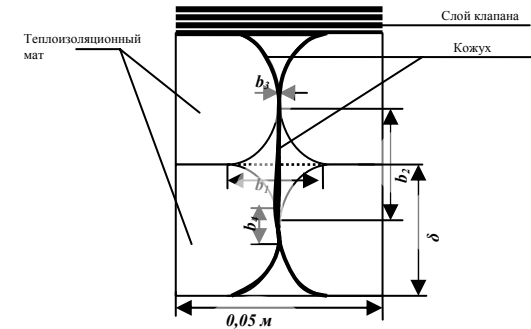


Рисунок 2 - Схема стыка между модулями БМТИ

Полагая, что реальный материал состоит из комбинации двух предельно простейших структур - чередующихся полос твердого материала и газа одинаковой толщины, расположенных параллельно и перпендикулярно тепловому потоку составляющих соответственно части  $1-\omega$  и  $\omega$  объема материала, коэффициент теплопроводности стыка между модулями рассчитаем по формуле

$$\lambda'_{эф} = \frac{1}{\frac{1-\omega}{\lambda_{ст}} + \frac{\omega}{\lambda_{кт}}},$$

где величину  $\omega$  определяется по таблице 1;

$$\lambda_{ст} = \lambda_1 \left( 1 - \frac{b_1 b_2 + 2b_3 b_4}{2b_1 \delta - b_1 b_2 - 2b_3 b_4} \right) + \lambda_2 \frac{b_1 b_2 + 2b_3 b_4}{2b_1 \delta - b_1 b_2 - 2b_3 b_4} - \text{коэффициент}$$

теплопроводности стыка ( $\lambda_1, \lambda_2$  - коэффициент теплопроводности

твердого остова системы и газа);  $\lambda_{кт} = \left( \frac{1-p_0}{\lambda_1} + \frac{p_0}{\lambda_2} \right)^{-1}$  - коэффициент

теплопроводности клапана ( $p_0$  - отношение объема пор, заключенных в выделенном объеме материала, к этому объему).

Т а б л и ц а 1 - Корреляция между пористостью и величиной  $\omega$

$p^*$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,85	0,97
$\omega$	0,075	0,09	0,1	0,11	0,18	0,13	0,15	0,174	0,35	0,55	0,64

Коэффициент теплопроводности твердого остова клапана (ткани)

$$\lambda'_1 = \lambda_{\text{вол}} \left[ \left( \frac{m_{\text{ТК}}}{h_{\text{ТК}} \rho} \right)^2 + \frac{\lambda_{\text{возд}}}{\lambda_{\text{вол}}} \left( 1 - \frac{m_{\text{ТК}}}{h_{\text{ТК}} \rho} \right)^2 + \frac{4 \left( 1 - \frac{m_{\text{ТК}}}{h_{\text{ТК}} \rho} \right) \left( \frac{m_{\text{ТК}}}{h_{\text{ТК}} \rho} \right)}{1 + \frac{\lambda_{\text{возд}}}{\lambda_{\text{вол}}}} \right],$$

где  $\rho$  - плотность волокна;  $h_{\text{ТК}}$  - толщина ткани;  $m_{\text{ТК}}$  - масса ткани.

В данной главе для подтверждения адекватности модели теплопередачи и пригодности методики расчета эффективной теплопроводности волокнистых материалов были проведены тестовые расчеты и сопоставлены с экспериментальными данными, полученными в главе 3 диссертационной работы и результатами, полученными другими исследователями (рисунок 3). Также были проведены расчетные исследования по определению зависимости теплопроводности волокнистых материалов от других характеристик материала (плотности, среднего диаметра, температуры эксплуатации) (рисунок 4).

Анализ полученных результатов моделирование теплопередачи в теплоизоляционном слое БСТИ позволяет заключить, что:

- результаты расчетных и экспериментальных исследований показали хорошую качественную и количественную сходимость;

- зависимость эффективной теплопроводности от плотности волокнистых теплоизоляционных материалов при повышенной температуре исследованных материалов имеет одинаковый характер и описывается плавной кривой, имеющей минимум. Максимальный коэффициент наблюдается при малой плотности материала, по мере увеличения плотности он уменьшается, достигая при определенном

значении минимума, затем с повышением плотности снова возрастает;

- зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от среднего диаметра волокон описывается плавной кривой, имеющей минимум, причем максимальный коэффициент достигается при малой плотности материала (50) и высокой температуре (150 - 400 °C).

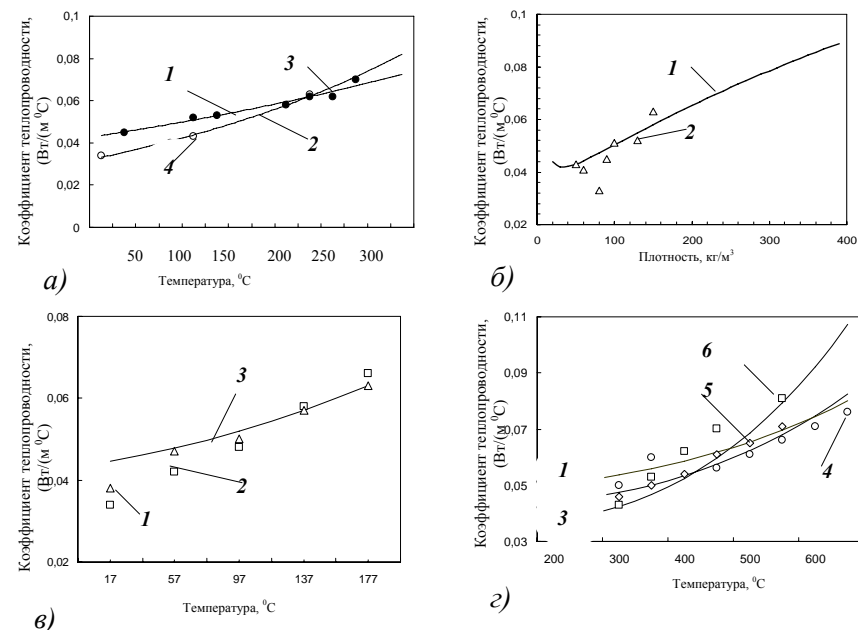


Рисунок 3 – Расчетные и экспериментальные зависимости теплопроводности

а) холстов из базальтового волокна плотностью 70 кг/м<sup>3</sup>, диаметром 3 мкм (1, 3) и стеклянного волокна плотностью 50 кг/м<sup>3</sup>, диаметром 2,9 мкм (2, 4); б) базальтовых волокон ( $d_{\text{сп}} = 3$  мкм,  $T = 22$  °C): 1, 2 – расчетные и экспериментальные данные; в) стеклянных волокон диаметром 5 мкм, плотностью 60 кг/м<sup>3</sup> от температуры: 1, 2 – Скрябин С. А.; 3 – расчет; г) базальтовых волокон диаметром 3 мкм плотностью 120 (1, 4), 80 (2, 5) 40 кг/м<sup>3</sup> (3, 6) расчет и эксперимент Белостоцкой В. Я.