

А. М. Гусаров, А. А. Кузнецов

**ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ПАКЕТОВ
МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ
ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ**

МОНОГРАФИЯ

Витебск
2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

А.М. ГУСАРОВ, А.А. КУЗНЕЦОВ

**ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ
СВОЙСТВ ПАКЕТОВ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ
ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ**

Монография

Витебск
2017

УДК 677.017.56
ББК 37.23
Г 96

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Материаловедение и товарная экспертиза» ФГБОУ ВО «РГУ им. А. Н.
Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», действительный член
Международной и Российской инженерной академии Шустов Ю. С.;

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Техническое регулирование и товароведение» УО «ВГТУ»
Буркин А. Н.

Рекомендовано к изданию Советом УО «ВГТУ»,
протокол № 2 от 31.10.2017.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским
советом УО «ВГТУ», протокол № 7 от 27.10.2017.

Гусаров, А. М.

Г 96 Оценка и прогнозирование теплозащитных свойств пакетов
материалов для специальной защитной одежды пожарных : монография
/ А. М. Гусаров, А. А. Кузнецов. – Витебск : УО «ВГТУ», 2017. – 174 с.
ISBN 978-985-481-531-2

Приводится обобщающий теоретический и практический материал по
оценке и прогнозированию основных показателей, характеризующих
теплозащитные свойства пакетов материалов для специальной защитной одежды
пожарных, методами математического моделирования процесса испытания.

Для инженерно-технических работников текстильной промышленности,
научных работников, специализирующихся на вопросах обеспечения качества
текстильных материалов.

УДК 677.017.56
ББК 37.23

ISBN 978-985-481-531-2

© УО «ВГТУ», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА. 1 СИСТЕМАТИЗАЦИЯ НОМЕНКЛАТУРЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПАКЕТОВ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СПЕЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ.....	7
1.1 Общие сведения о специальной защитной одежде пожарных.....	7
1.2 Общая характеристика материалов, используемых при изготовлении боевой одежды пожарных.....	9
1.3 Анализ требований к показателям теплофизических свойств материалов боевой одежды пожарных и методы их оценки.....	13
1.4 Анализ методов оценки показателей качества материалов и их пакетов боевой одежды пожарных при эксплуатации.....	23
1.5 Основные направления совершенствования системы оценки теплозащитных свойств специальной защитной одежды пожарных.....	28
ГЛАВА. 2 ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МНОГОСЛОЙНОМ ПАКЕТЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ БОЕВОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ ПРИ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ.....	32
2.1 Методы расчета процесса теплопередачи в условиях нестационарной теплопроводности.....	33
2.1.1 Особенности переноса тепла через текстильные материалы....	33
2.1.2 Анализ методов решения уравнений теплопроводности.....	37
2.2 Зональный метод расчета процесса теплопереноса в многослойном пакете материалов боевой одежды пожарных.....	41
2.2.1 Физико-математическая постановка задачи о теплопередаче через многослойный пакет материалов боевой одежды пожарных в условиях нестационарной теплопроводности при несимметричных граничных условиях.....	41
2.2.2 Аналитические решения задач теплопередачи для наружного, промежуточных и внутреннего слоев пакета материалов боевой одежды пожарных в условиях нестационарной теплопроводности.....	45
2.2.3 Алгоритм расчета распределения температуры в многослойном пакете материалов при испытаниях на устойчивость к тепловому воздействию с учетом зависимости показателей теплофизических свойств материалов пакета от температуры.....	55
2.2.4 Определение рациональных режимов моделирования процесса теплопереноса в многослойном пакете материалов	

боевой одежды пожарных	59
2.3 Исследование процессов теплопереноса в многослойном пакете материалов для боевой одежды пожарных при несимметричных граничных условиях	66
2.3.1 Оценка параметров математических моделей процесса теплопереноса в многослойном пакете материалов боевой одежды пожарных	68
2.3.2 Исследования распределения температуры в многослойном пакете материалов для боевой одежды пожарных при различном тепловом воздействии.....	73
ГЛАВА. 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ПАКЕТОВ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ БОЕВОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ ПРИ РАЗЛИЧНОМ УРОВНЕ ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	80
3.1 Теоретическое обоснование показателей, характеризующих теплозащитные свойства боевой одежды пожарных при различном уровне теплового воздействия.....	80
3.2 Экспериментальные исследования закономерностей изменения теплозащитных показателей пакета материалов боевой одежды пожарных при различном уровне теплового воздействия.....	85
3.2.1 Комплексное исследование процесса теплопереноса в пакете материалов и определение времени безопасной эксплуатации боевой одежды пожарных.....	85
3.2.2 Методика оценки показателей, характеризующих теплозащитные свойства боевой одежды пожарных, по результатам кратковременных испытаний на устойчивость к тепловому воздействию.....	92
3.2.3 Типовой расчет показателей, характеризующих теплозащитные свойства боевой одежды пожарных, по результатам кратковременных испытаний	94
3.3 Исследование теплозащитных свойств пакетов материалов для боевой одежды пожарных с различным теплоизоляционным слоем.....	98
ГЛАВА. 4 КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПАКЕТА МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ БОЕВОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ В ПРОЦЕССЕ МНОГОЦИКЛОВОГО ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ..	105
4.1 Теоретический анализ закономерностей изменения показателей теплофизических свойств пакета материалов боевой одежды пожарных в процессе многоциклового теплового воздействия.....	106
4.1.1 Разработка вероятностных математических моделей изменения показателей теплофизических свойств пакета материалов боевой одежды пожарных в процессе	

многоциклового теплового воздействия.....	107
4.1.2 Разработка математических моделей изменения показателей теплофизических свойств пакета материалов боевой одежды пожарных в процессе многоциклового теплового воздействия с использованием основного принципа теории надёжности профессора Н. М. Седякина.....	112
4.2 Экспериментальные исследования закономерностей изменения показателей теплофизических свойств пакета материалов боевой одежды пожарных в процессе испытания на устойчивость к многократному тепловому воздействию	114
ГЛАВА. 5 РАЗРАБОТКА ЭКСПРЕСС-МЕТОДОВ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ БЕЗОПАСНОГО СРОКА СЛУЖБЫ БОЕВОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	126
5.1 Теоретический анализ закономерностей изменения эксплуатационных свойств боевой одежды пожарных в процессе многократного воздействия основных факторов износа.....	127
5.1.1 Общие сведения об износостойкости текстильных изделий и критериях оценки износа.....	127
5.1.2 Разработка вероятностных математических моделей изменения эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов боевой одежды пожарных в процессе многократного воздействия основных факторов износа	131
5.1.3 Разработка математических моделей изменения эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов боевой одежды пожарных в процессе многократного воздействия различных факторов износа с использованием основного принципа теории надёжности профессора Н. М. Седякина.....	135
5.2 Экспериментальные исследования закономерностей изменения эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов боевой одежды пожарных при многократном воздействии основных факторов износа	137
5.3 Экспресс-методика определения безопасного срока службы боевой одежды пожарных при эксплуатации	146
5.4 Типовой расчет безопасного срока службы боевой одежды пожарных при эксплуатации.....	150
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	155
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	156
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	169

ВВЕДЕНИЕ

Среди технических средств обеспечения безопасных условий труда пожарных доминирующую роль играет специальная защитная одежда, являющаяся последним барьером, который способен сохранить жизнь и здоровье людей. Одним из главных вопросов, решаемых при создании защитной одежды, является оптимальный выбор тканей и материалов для каждого вида одежды на основании учета поражающих факторов [1–3].

Важнейшим этапом проектирования одежды специального назначения является проведение комплекса нормативных испытаний материалов. Зачастую именно нормативные испытания новых материалов по требованиям безопасности служат фактором, замедляющим проектирование и внедрение в производство современной защитной одежды пожарных.

Для снижения сроков проектирования и стоимости изделий необходимо совершенствование средств и методической базы испытаний материалов по требованиям безопасности. Кроме того, до настоящего времени не решены вопросы надёжности и безопасной эксплуатации защитной одежды пожарных.

Вследствие этого развитие системы оценки качества специальной защитной одежды пожарных, разработка комплексных методов оценки ее показателей теплозащитных свойств, а также прогнозирование их изменения в процессе эксплуатации остается актуальной научной задачей. Одним из перспективных направлений повышения эффективности проектирования и подготовки производства защитной одежды является применение средств автоматизации при проведении теоретических и экспериментальных исследований теплозащитных свойств материалов с целью получения объективной и полной информации для принятия решения.

ГЛАВА 1

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ НОМЕНКЛАТУРЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПАКЕТОВ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ СПЕЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ

1.1 Общие сведения о специальной защитной одежде пожарных

Специальная защитная одежда пожарных (СЗО пожарных) предназначена для обеспечения безопасных и эффективных условий работы пожарных. Она выступает непосредственным барьером между человеком и опасными факторами пожара. По степени защиты (прежде всего тепловой), условиям эксплуатации, типу решаемых оперативно-тактических задач СЗО пожарных делится на три вида: боевая одежда пожарных (БОП), специальная защитная одежда от повышенных тепловых воздействий (СЗО ПТВ), а также специальная защитная одежда изолирующего типа (СЗО ИТ) [1, 4].

У каждого вида специальной защитной одежды пожарных свои предельные значения показателей защитных свойств, которые зависят как от конструктивных особенностей костюмов, так и от применяемых для их изготовления материалов. Комплекс требований, предъявляемых к каждому виду СЗО пожарных и её параметрам, изложен в соответствующих нормативных документах.

Боевая одежда пожарных является важнейшим и самым массовым средством индивидуальной защиты пожарных по применяемости и используется при тушении всех видов пожаров всеми категориями сотрудников МЧС. Комплексная оценка показателей эксплуатационных свойств БОП является наиболее важным элементом в обеспечении безопасности пожарного при проведении работ по тушению пожаров и связанных с ними аварийно-спасательных работ.

Эксплуатационные свойства защитной одежды пожарных в большей степени зависят от материалов и тканей, используемых при ее изготовлении, чем от конструктивного исполнения. Поэтому основные пути для улучшения защитных характеристик СЗО пожарных лежат в области использования все более новых и совершенных материалов и тканей [4].

«Боевая одежда пожарных – одежда, предназначенная для защиты тела человека от воздействия высоких температур окружающей среды, тепловых потоков, открытого пламени, контакта с нагретыми поверхностями, механических воздействий, воды и агрессивных сред, а также от неблагоприятных климатических воздействий при проведении

работ по тушению пожаров и связанных с ними аварийно-спасательных работ» [5].

БОП состоит из куртки с капюшоном и брюк (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Технический эскиз куртки, капюшона и брюк боевой одежды пожарных [6]

Пакет материалов и тканей, используемых для изготовления боевой одежды пожарных, состоит из материала верха, водонепроницаемого слоя, съемной теплоизоляционной подкладки и подкладочной ткани.

«Материал верха боевой одежды пожарных – наружный слой пакета материалов, используемый для изготовления боевой одежды пожарных, обеспечивающий защиту тела человека от воздействия высоких температур окружающей среды, тепловых потоков, открытого пламени, контакта с нагретыми поверхностями, механических воздействий, воды и агрессивных сред, а также от неблагоприятных климатических воздействий» [5].

«Водонепроницаемый слой боевой одежды пожарных – слой пакета материалов, используемый для изготовления боевой одежды пожарных и предназначенный для защиты теплоизоляционной подстежки и внутреннего слоя от проникновения воды и агрессивных сред, а также от неблагоприятных климатических воздействий. В некоторых моделях водонепроницаемый слой совмещают со съемной теплоизоляционной подкладкой или материалом верха. Часто используются материалы, во-

донепроницаемость которых обеспечивается полимерным пленочным покрытием» [5].

«Теплоизоляционная подстежка боевой одежды пожарных – элемент одежды, используемый для изготовления боевой одежды пожарных, обладающий низкой теплопроводностью и предназначенный для защиты от воздействия высоких температур окружающей среды, тепловых потоков, а также от неблагоприятных климатических воздействий» [5].

В настоящее время боевую одежду пожарных производят двух видов: для начальствующего и рядового состава, которые отличаются по различным информативным конструктивным элементам (полосы, нашивки и кокетки, а также другие элементы).

Наиболее часто к травматизму и гибели пожарных приводят тепловые факторы пожара: воздействие конвективных тепловых потоков, нагретых твердых поверхностей, излучение факела пламени. Человек, участвующий в тушении пожара, подвергается тепловым воздействиям в экстремальных ситуациях.

С точки зрения защитных показателей боевой одежды пожарных материал верха наиболее важен – он должен выдерживать высокие температуры в условиях окружающего огня и жары и при этом противостоять механическим воздействиям: ударам и трению осколками стекла, острыми предметами и т. п.

1.2 Общая характеристика материалов, используемых при изготовлении боевой одежды пожарных

Основоположником в проектировании и производстве термостойких тканей специального назначения является фирма «Дюпон» (США). Ими был получен патент «Тканый материал для использования в защитной одежде и защитная одежда улучшенного комфорта» [7, 8], основные тенденции которого до настоящего времени остаются актуальными при производстве материала верха для защитной одежды пожарных.

Компания «Дюпон» использует арамидные волокна «Номекс» и «Кевлар» для производства термостойкой ткани. Ткани семейства «Номекс» заметно выделяются на рынке термостойких тканей специального назначения с пропитками, а также термостойких тканей для спецодежды с постоянными защитными свойствами. У термостойкой ткани «Номекс» низкая теплопроводность, благодаря чему обеспечивается защита человека от ожогов II и III степени, также эти ткани обладают полезным свойством самозатухания, хорошо переносят стирки и химчистки. К основным недостаткам тканей «Номекс» относят высокую термическую

усадку, что, как следствие, приводит к уменьшению размеров одежды на 10–40 %. Но добавление в состав большего процентного содержания «Кевлара» снижает термическую усадку, однако при этом возникают трудности с окраской суровых тканей.

В России были разработаны такие термостойкие волокна как «Терлон», «СВМ», «Армос» и др. Российские волокна не уступают зарубежным аналогам, но пока не получили массового распространения. В настоящее время в качестве сырьевого компонента для изготовления тканей специального назначения в России используется в основном комплексная нить СВМ производства ОАО «Каменскхимволокно» (г. Каменск-Шахтинский). В 1997 году на основе комплексной синтетической нити СВМ линейной плотности 29,4 текс была создана ткань «Силотекс-97», которая производится на предприятии ЗАО «Элиот» (г. Санкт-Петербург). Недостатком «Силотекс-97» является низкая поверхностная плотность ткани, что приводит к необходимости увеличения толщины теплоизоляционной подкладки с целью снижения теплового воздействия из окружающей среды и, соответственно, к удорожанию защитной одежды пожарных.

Другое российское предприятие, ЗАО «АСО» (г. Санкт-Петербург), разработало и освоило серийный выпуск термостойкой ткани «Пировитекс», которая также используется для изготовления боевой одежды пожарных. Эта ткань производится из смесовой пряжи полиарамидных волокон, она не самовоспламеняема, не взрывоопасна, не токсична.

Производством материалов для специальной защитной одежды так же занимается ООО ПФ «Кадотекс-2000» (г. Москва) – единственная в России компания, которая производит материал «Номекс» по лицензии фирмы «Дюпон». Одно из основных направлений деятельности фирмы «Кадотекс-2000» – производство огнетермостойких тканей из данного волокна (ткань «Надежда», «Номекс», «Огнетекс»), а также защитной одежды для пожарных и нефтяников.

В Республике Беларусь в качестве материала верха БОП используется уникальный по своим свойствам термостойкий материал на основе волокна «Арселон-С». Уникальность материала заключается в уровне его термостойкости, он способен выдерживать температуру окружающей среды, равную 300 °С, без значительных изменений размеров и протекания термоокислительных и термодеструктивных процессов. Термостойкий материал «Арселон-С» выполнен полотняным или саржевым переплетением из штапельного волокна [9]. Высокие теплоизоляционные свойства, необходимая воздухопроницаемость и водоупорность обеспечиваются свойствами полиоксидазольного волокна и термостойких составляющих волокон.

Волокна, нити и пряжа на основе волокна «Арселон-С» изготавливаются на ОАО «СветлогорскХимволокно». Материал на основе во-

локна «Арселон-С» производится на ОАО «Кобринская прядильно-ткацкая фабрика «Ручайка».

Фактическая мощность установки по производству волокна «Арселон-С» на ОАО «СветлогорскХимволокно» составляет 143 тонны в год. На 1 м. п. ткани (ширина 160 см) требуется 555 г волокна. Следовательно, при данной мощности можно вырабатывать на давальческой основе порядка 257 тыс. м. п. арселоновой ткани. Расход арселоновой светостабилизированной ткани на 1 костюм пожарного – 4 м. п. (ширина 1,6 м). Таким образом, из вырабатываемого волокна при существующей мощности можно пошить около 64 тыс. костюмов.

Некоторые физико-механические и теплофизические свойства термостойких тканей, используемых в качестве материала верха БОП, приведены в таблице 1.1 [10, 11].

Таблица 1.1 – Физико-механические и теплофизические свойства термостойких тканей, используемых для изготовления материала верха БОП

Наименование показателя	Единица измерения	Наименование ткани		
		«Арселон»	«Силотекс-97»	«Номекс Дельта Т Рип-Стоп»
Поверхностная плотность	г/м ²	269	220	265
Разрывная нагрузка: – по основе, – по утку	Н	1295 859	1000 1200	1000 1000
Усадка после нагревания	%	5	5	5
Раздирающая нагрузка: – по основе, – по утку	Н	140 147	140 140	120 117
Устойчивость к воздействию открытого пламени	с	18	15	15
Устойчивость к контакту с нагретыми до +400°С твердыми поверхностями		Разрушений наружной поверхности ткани не выявлено		
Кислородный индекс	%	28	28	28
Стоимость 1 м ² ткани	дол. США	14	20	23

Таким образом, сегодня зарубежные и отечественные производители предлагают широкий ассортимент термостойких тканей, которые могут использоваться для производства защитной одежды пожарных. Белорусский термостойкий материал «Арселон-С» не уступает, а по некоторым показателям превосходит зарубежные аналоги.

Водонепроницаемый слой и теплоизоляционная подстежка боевой одежды пожарных не подвергаются таким жестким воздействиям, как материал верха, однако играют важную роль для общей безопасно-

сти пожарного. Эти два слоя БОП обеспечивают до 70–75 % тепловой защиты пожарного. Теплоизоляционная подстежка и водонепроницаемый слой обычно сшиваются друг с другом и прикрепляются к материалу верха «липучками» или застежками.

Способ обработки текстильного материала для придания ему водоотталкивающих свойств показан в патенте Soil resistant cleanable clothing [12]. В нем описана ткань, состоящая из нитей, которые образованы из элементарных волокон, при этом ткань имеет промежутки (пустые пространства) между нитями. Нити по существу полностью покрыты силиконовым покрытием, однако силиконовое покрытие не полностью заполняет промежутки между нитями, поэтому текстильный материал с таким покрытием обладает высокой гидрофобностью.

На основании патента [12] компания W.L. Gore & Associates выпускает ткани с мембраной Crosstech, которые и используются в качестве водонепроницаемого слоя для защитной одежды пожарных за рубежом. Большинство российских и белорусских производителей боевой одежды пожарных задачу водонепроницаемости решают либо с помощью традиционных дополнительных обработок ткани полимерным покрытием, либо включением в пакет материалов дополнительного водонепроницаемого слоя.

В Республике Беларусь зарегистрирован патент «Термостойкий слоистый материал для защитной одежды» [13]. Данное техническое решение представляет собой многослойный пакет материалов, состоящий из наружного огнезащитного тканого слоя из термостойких нитей, водоизолирующего полимерного слоя, промежуточного теплоизолирующего нетканого слоя из термостойких волокон и внутреннего гигиенического слоя из хлопчатобумажной ткани. Отличительной особенностью многослойного материала является то, что наружный слой вместе с нанесенным на его изнаночную сторону водоизолирующим полимерным слоем на основе силиконовых композиций образуют двухслойный наружный легко съемный огне- и водозащитный пакет, а промежуточный теплоизолирующий нетканый слой и внутренний гигиенический слой объединены в прошивной теплоизолирующий пакет, дополнительно содержащий промежуточный слой-прокладку из прошивного ватина. Применение такого легко разъемного составного пакета материалов позволяет наряду с сохранением высоких защитных свойств расширить видовой ассортимент защитной одежды, увеличить срок ее эксплуатации за счет обеспечения ремонтноспособности, так как обеспечивается самостоятельное использование составных пакетов в качестве защитной одежды различного применения и легкость замены одного из составных пакетов при повреждении одежды.

РПУП «Униформ» (г. Микашевичи) изготавливает боевую одежду пожарных как с нанесенным на изнаночную сторону материала верха водоизолирующим полимерным слоем, так и с отдельным водонепро-

нищаемым слоем, в качестве которого используется мембранный материал ТУ ВУ 300620644.017-2008, производимый СООО «Интерпласт» (г. Пинск) [14].

Для теплоизоляционной подстежки зарубежные производители защитной одежды пожарных используют текстильный материал Caldura, Aralite и др. Лидером среди тепловых барьерных материалов является Caldura. Его внешняя ткань сшивается с арамидным ватином, обеспечивая гладкую поверхность, которая позволяет человеку быстрее надевать и снимать защитную одежду. Материал Caldura обладает хорошей устойчивостью против скатывания волокон в комки, что очень важно для пожарных подразделений с большим объемом работы. Текстильный материал Aralite представляет собой легкий тепловой барьер с внешней тканью на основе Nomex, обеспечивающий повышенный комфорт и более гибкую тепловую защиту [15]. В Республике Беларусь в качестве теплоизоляционного слоя в пакете материалов для БОП используется ватин полушерстяной, производимый Слонимским камвольным комбинатом.

На основании вышеизложенного очевиден тот факт, что все защитные костюмы трудоемки в изготовлении и имеют высокую стоимость.

Обзор литературных и патентных источников показал, что работы в области создания спецодежды ведутся как в странах ближнего, так и дальнего зарубежья, и исследования авторов в основном направлены на проектирование огнестойкого материала или пакета в целом. Текстильная промышленность располагает достаточно широким ассортиментом термостойких тканей, вполне пригодных для изготовления защитной одежды пожарных, однако не все они доступны как по масштабам производства, так и по стоимости. В Республике Беларусь производство огнетермостойких волокон и тканей специального назначения осуществляется на базе ОАО «СветлогорскХимволокно» и ОАО «Кобринская прядильно-ткацкая фабрика «Ручайка».

1.3 Анализ требований к показателям теплофизических свойств материалов боевой одежды пожарных и методы их оценки

У каждого вида СЗО пожарных свои предельные значения защитных, эргономических, оперативно-тактических показателей. Требования, предъявляемые к каждому виду специальной одежды и её параметрам, изложены в нормативных документах. В соответствии с ТНПА, действующими на территории Республики Беларусь, требования к материалам и их пакетам, используемым для изготовления боевой одежды пожарных, регламентируются СТБ 1971-2009 [5].

По показателям теплофизических свойств пакет материалов БОП должен соответствовать нормативным требованиям, указанным в таблице 1.2 [5].

Таблица 1.2 – Показатели теплофизических свойств пакета материалов БОП

Наименование показателя	Норма
Устойчивость к воздействию теплового потока, с, не менее: – 5,0 кВт/м ² , – 40,0 кВт/м ²	240, 5
Устойчивость к воздействию открытого пламени, с, не менее	15
Теплопроводность при температуре от 50 °С до 150 °С, Вт/(м·К), не более	0,06

По показателям теплофизических свойств материал верха БОП должен соответствовать нормативным требованиям, указанным в таблице 1.3 [5].

Таблица 1.3 – Показатели теплофизических свойств материала верха БОП

Наименование показателя	Норма
Устойчивость к воздействию температуры 300 °С, с, не менее	300
Устойчивость к контакту с нагретыми до 400 °С твердыми поверхностями, с, не менее	10
Кислородный индекс, %, не менее	28
Устойчивость к воздействию открытого пламени, с, не менее	15

Требования к показателям физико-механических свойств материала верха и пакета материалов БОП также регламентированы стандартом [5].

Наряду с описанием нормативных требований в стандарте содержится описание методов контроля теплофизических и физико-механических показателей материалов и их пакетов. Особый интерес представляют методы контроля теплофизических показателей, так как самой распространенной причиной травматизма и гибели пожарных являются тепловые воздействия пожара.

Для определения *устойчивости пакета материалов к воздействию теплового потока* [5] отбирают пробы размером 210×70 мм. Испытания проводят на установке, схема которой показана на рисунке 1.2 [5].

В качестве источника излучения используют радиационную панель размером 200×150 мм с нагревательным элементом в виде спирали из нихромовой проволоки по ГОСТ 14081. Для измерения значений плотности теплового потока используют датчик типа Гордона с диапазоном измерения от 1 кВт/м² до 50 кВт/м², а для измерения температуры на внутренней поверхности пакета материалов крепят три термопары

ТХК (хромель/копель) под углом 120° друг к другу на расстоянии (20 ± 2) мм от центра датчика. Измерение температуры и плотности теплового потока проводят одновременно.

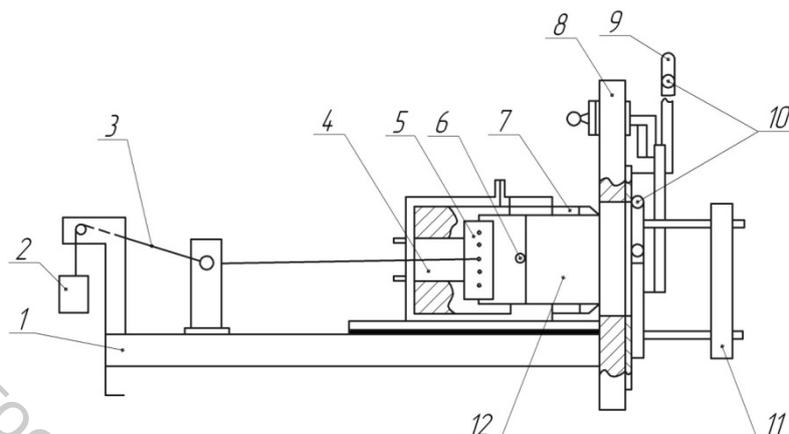


Рисунок 1.2 – Схема установки для определения устойчивости материалов к воздействию теплового потока:

- 1 – платформа; 2 – груз; 3 – нити; 4 – датчик измерения плотности теплового потока; 5 – зажим; 6 – термопара; 7 – держатель пробы; 8 – экран; 9 – защитная заслонка; 10 – система охлаждения; 11 – радиационная панель; 12 – проба

Во время проведения испытаний включают радиационную панель, регистрирующие приборы и систему охлаждения. Поднимают защитную заслонку, открывая тем самым доступ теплового потока к датчику. Изменяя расстояние между источником теплового излучения и датчиком, устанавливают держатель пробы на таком расстоянии от радиационной панели, при котором значение плотности теплового потока, падающего на пробу, равно указанного в таблице 1.2. Опускают заслонку и фиксируют расстояние от экрана до держателя на платформе. Закрепляют пробы пакета материалов на рабочем участке датчика с помощью зажимов и устройства натяжения. Поднимают заслонку и выдерживают пробу под действием теплового потока установленной плотности в течение времени, указанного в таблице 1.2. Измеряют плотность теплового потока, прошедшего через пробу, и температуру на внутренней поверхности пробы.

Пакет материалов БОП считают выдержавшим испытания, если среднеарифметическое значение температуры на внутренней поверхности пакета материала БОП в течение испытания изменилось не более чем на 50°C и на пробах не произошло [5]: разрушения наружной поверхности материала верха и внутренних слоев пакета (оплавления, обугливания, прогара); отслоения покрытия от тканевой основы (для материалов с полимерным пленочным покрытием); воспламенения; увеличения плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов БОП до значения, превышающего 2500 Вт/м^2 ; сниже-

ния значений разрывной нагрузки и сопротивления раздиранию материала верха более чем на 20 % от нормативных требований к ним.

Для определения *устойчивости пакета материалов, материала верха к воздействию открытого пламени* [5] отбирают пробы пакета материалов и материала верха размером 140×60 мм. Для испытаний используют горелку, конструкция и описание которой показаны в стандарте [5, с. 14, рисунки Б.1–Б.4].

Закрепляют пробу пакета материалов, материала верха на установочных шпильках рамки. Зажигают горелку и прогревают ее в течение 2 минут. Устанавливают высоту пламени, измеренную как расстояние между верхней частью трубки горелки и верхом конусной желтой части пламени (40 ± 2) мм. Подводят горелку к пробам пакета материалов и материала верха для обеспечения поверхностного и кромочного зажигания, соответственно [5, с. 16, рисунки Б.5, Б.6]. Включают секундомер и после окончания времени воздействия открытого пламени в соответствии с таблицами 1.2, 1.3 удаляют горелку.

Материал верха и пакет материалов считают выдержавшими испытания, если [5]: время остаточного горения составило не более 2 секунд; время остаточного тления составило не более 2 секунд; отсутствуют разрушения входящих в состав пакета материалов теплоизоляционной подстежки и внутреннего слоя (обугливание, прогар). Те же результаты испытаний должны наблюдаться и после пяти стирок материала верха по ГОСТ 30157.1.

Для определения *теплопроводности пакета материалов* [5] отбирают пробы пакета материалов размером 1000×350 мм. Испытания проводят на лабораторной установке, схема которой показана на рисунке 1.3 [5].

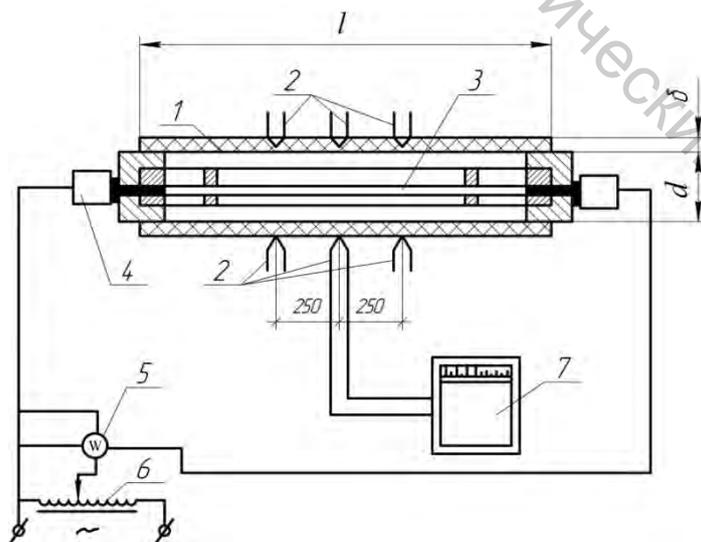


Рисунок 1.3 – Схема установки для определения теплопроводности материалов:
1 – испытываемая проба; 2 – термопары; 3 – электронагреватель;
4 – токопроводящая втулка; 5 – ваттметр; 6 – автотрансформатор; 7 – потенциометр

Для измерения температуры используют шесть термопар ТХК (хромель/копель). Термопары выводят на вторичный прибор для измерения рабочей температуры с классом точности не ниже 0,5 и пределами измерения от 0 °С до 200 °С.

Измеряют толщину пробы толщиномером с индикатором по ГОСТ 11358 и ценой деления 0,01 мм, диаметром измерительной поверхности 10 мм. Пробу сшивают в виде цилиндра и надевают на металлическую трубу. Устанавливают термопары на наружную поверхность пробы. Включают установку и создают тепловой поток произвольной мощности. При достижении стационарного режима теплового потока фиксируют значения температур. Далее аналогично проводят испытания при значениях мощности электронагревателя, отличающихся от первоначального режима на (10 ± 2) и (20 ± 2) Вт соответственно.

Теплопроводность пробы определяют по формуле [5]

$$\lambda = \frac{P \cdot \ln\left(l + \frac{\delta}{d}\right)}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (t_2 - t_1)},$$

где P – мощность электронагревателя, Вт; l – длина трубы, м; δ – толщина пробы, м; d – наружный диаметр цилиндрического нагревателя, м; t_1 и t_2 – средние арифметические значения температур на внутренней и внешней поверхностях пробы, °С.

За результат испытания принимают среднеарифметическое значение теплопроводности.

В 1999 г. ФГУ ВНИИПО МВД России разработаны нормы пожарной безопасности НПБ 157-99 [16]. Данные нормы определяют общие технические требования, методы испытаний, правила и порядок оценки качества боевой одежды пожарного, а также материалов и тканей, применяемых для ее изготовления. Сравнительный анализ технических стандартов для боевой одежды пожарных, принятых в Республике Беларусь и Российской Федерации, показал идентичность требований теплофизическим и физико-механическим показателям материалов и тканей одежды пожарных, а также методов их оценки.

В европейских странах Техническим комитетом Европейского экономического сообщества CEN/TC 162 при DIN разработаны требования к специальной защитной одежде пожарных. Требования к европейскому аналогу боевой одежды пожарного регламентируются документом EN 469:2005 [17].

Необходимо отметить, что тактика тушения пожара в Республике Беларусь и за рубежом различаются, поэтому и требования стандартов к боевой одежде пожарных имеют вполне закономерные различия.

По европейскому стандарту проверяется огнестойкость всех ма-

териалов, входящих в состав БОП, а также швы. По СТБ испытываются только пакет материалов и материал верха. По EN 469 воздействие пламени длится 10 секунд, а по СТБ 1971-2009 – составляет 15 секунд. В Европе материалы считаются прошедшими испытания, если на них не образовались дыры, не наблюдается остаточного горения и тления более 2 секунд. СТБ поддерживает эти требования, однако при этом допускает сквозное прогорание материала верха при испытании пакета, если теплоизоляционная подкладка и внутренний слой при этом не разрушились. Причину такого послабления СТБ не объясняет. Кроме этого, европейский стандарт рекомендует проводить стирку всех материалов, входящих в пакет, такое количество раз, которое названо максимальным в инструкции по эксплуатации изделия. СТБ предписывает соблюдение требований по огнестойкости после 5 стирок, причем, только материала верха.

Проверка устойчивости к воздействию теплового излучения предусмотрена обоими стандартами. Сходна и методика проведения испытаний: образец закрепляют в держателе и подвергают воздействию теплового излучения определенного уровня. На этом сходство заканчивается, так как в ходе испытаний снимаются разные показатели. Европейский стандарт не задает определенного времени испытаний и исходит из того, что вероятность возникновения ожога зависит от скорости подъема температуры. Поэтому при испытании фиксируется время нагрева на $(12 \pm 0,2) \text{ } ^\circ\text{C}$ и на $(24 \pm 0,2) \text{ } ^\circ\text{C}$ от изначального показателя ($20 \text{ } ^\circ\text{C}$) при плотности теплового потока равном 40000 Вт/м^2 , а затем вычисляется разность этих значений. Чем больше эта разность, тем более высокий уровень защиты обеспечивает одежда. Минимальные требования стандарта EN 469 по показателю передачи тепла (RHTI) приведены в таблице 1.4 [17].

Таблица 1.4 – Требования стандарта EN 469 по показателю передачи тепла

Показатель передачи тепла	Уровень 1	Уровень 2
RHTI24 (до $44 \text{ } ^\circ\text{C}$)	$\geq 10 \text{ с}$	$\geq 18 \text{ с}$
RHTI12 (до $32 \text{ } ^\circ\text{C}$)	$\geq 3 \text{ с}$	$\geq 4 \text{ с}$

СТБ не отслеживает скорость подъема температуры, а регистрирует температуру по истечении заданного времени при двух значениях плотности теплового потока (таблица 1.2).

Таким образом, при одинаковом значении плотности теплового потока (40000 Вт/м^2) европейский стандарт задает более высокие требования к одежде пожарного: нагрев до $44 \text{ } ^\circ\text{C}$ за 10 и 18 секунд против белорусских на $50 \text{ } ^\circ\text{C}$ за 5 секунд.

По EN 469 остаточная прочность на разрыв ткани верха определяется после воздействия на пакет материалов плотности теплового по-

тока равной 10000 Вт/м^2 . Прочность на разрыв должна быть, как и до испытаний, не менее 450 Н в обоих направлениях – по основе и утку. В соответствии с СТБ 1971-2009 плотность теплового потока составляет 5000 и 40000 Вт/м^2 , а остаточная прочность должна быть не меньше 800 Н по основе и 640 Н по утку.

Исходя из этого, европейский стандарт, в отличие от белорусского, не допускает снижения прочности в результате теплового воздействия, однако по конечному допустимому результату требования обоих стандартов являются сопоставимыми.

При испытаниях на устойчивость материалов к воздействию температуры образцы тканей выдерживают в течение 5 минут при повышенных температурах: по EN 469 – при $(180 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$, а по СТБ 1971-2009 – при $300 \text{ }^\circ\text{C}$. При этом европейский стандарт предписывает испытывать отдельно материалы каждого слоя всех предметов одежды. Образцы считаются прошедшими испытания, если они не воспламенились, не расплавились и усадка составила не более 5 %. По СТБ 1971-2009 для испытаний отбирают только ткань верха и накладок (светоотражающие и световозвращающие полосы). Образцы считаются прошедшими испытания, если они не воспламенились, не разрушились, не отслоилось покрытие (если оно было), а усадка составила не более 5 % по длине и ширине. Кроме того, физико-механические показатели не должны снизиться более чем на 30 % от нормативных значений. Следовательно, СТБ создает более жесткие условия для испытаний, но при этом проверке подвергаются не все материалы комплекта.

В США и Канаде требования к защитной одежде пожарных определены в стандартах серии NFPA. Общие технические требования, методы испытаний и порядок оценки результатов для североамериканского аналога боевой одежды пожарного регламентируются документом NFPA 1971 [18]. Данный технический стандарт во многом схож с европейским документом EN 469.

Определенный интерес вызывает критерий оценки результатов испытаний материалов при тепловом воздействии, которым иногда является степень теплового повреждения кожи пожарного.

Непосредственный контакт внутренней поверхности БОП с кожным покровом пожарного во время теплового воздействия может привести к возникновению ожоговых травм различной степени. Когда температура ткани человека поднимается выше $44 \text{ }^\circ\text{C}$, начинают возникать кожные ожоги со скоростью, которая зависит от уровня подъема температуры. Например, при $50 \text{ }^\circ\text{C}$ поражение кожи происходит в 100 раз быстрее, чем при $45 \text{ }^\circ\text{C}$, то есть повреждение кожи есть функция температуры кожи и времени, когда эта температура больше $44 \text{ }^\circ\text{C}$. Рост температуры кожи непосредственно связан с суммой поглощенной кожей тепловой энергией и не зависит от характера теплового воздействия [19].

Проведенные в 1960-х гг. исследования А. М. Stoll, М. А. Chianta [19–21] дают возможность количественно определить реакцию кожи человека на поглощаемую тепловую энергию. Полученные ими данные используются при построении Кривой Stoll, которая характеризует способность кожи человека переносить тепловое воздействие до появления ожоговой травмы второй степени.

Кривая Stoll широко используется в действующих стандартах, например в ТНПА США и Канады на защитную одежду для пожарных: NFPA 1971, NFPA 1977 [18, 22], ТНПА Российской Федерации на одежду специальную для защиты от термических рисков электрической дуги: ГОСТ Р 12.4.234-2007 [23].

Достоинствами Кривой Stoll являются простота ее применения, возможность количественной оценки теплозащитных свойств материалов. Недостаток в том, что она основана на данных, полученных при воздействии постоянного теплового потока, и позволяет только предсказать ожог II степени с вероятностью $p = 0,5$.

Некоторые современные исследования по совершенствованию оценки теплового поражения кожи в ходе определения теплозащитных свойств одежды пожарных представлены в [24–26].

В работах [27–29] были рассмотрены теплозащитные свойства защитных тканей при различных тепловых воздействиях высокой интенсивности с учетом защитных свойств кожного покрова человека. При этом основной целью исследования являлось установление времени от начала воздействия огня до получения кожей ожогов первой или второй степени тяжести.

Экспериментально был исследован 21 образец теплостойких тканей, изготовленных из полибензомидазола (РВІ), ароматического полиамида (арамида) и смесей из РВІ и арамида или с огнестойкими вискозными волокнами. Для проведения эксперимента была разработана специальная установка, в которой использовался комбинированный источник пламени и излучения. Установка была оснащена необходимой измерительной и регистрирующей аппаратурой и позволяла контролировать время теплового воздействия для измерения индекса термической устойчивости ткани.

Были исследованы взаимосвязи между изоляционными свойствами и свойствами полотен для нескольких режимов воздействия, а также получены зависимости защитных свойств образцов полотен в зависимости от времени теплового воздействия.

В результате анализа данных, полученных в этих экспериментальных исследованиях, были не только получены конкретные числовые данные для большого набора образцов, но и сделаны следующие обобщающие выводы.

Главным фактором, определяющим защитную способность материала для предотвращения ожогов второй степени, является абсолют-

ная интенсивность теплового воздействия. Поведение исследованных полотен заметно различается в зависимости от условий и вида теплового воздействия. Одновременное воздействие пламени и излучения менее опасно (при том же суммарном потоке тепловой энергии), чем только пламя или только излучение. Степень защиты может быть повышена, если использовать нетканые структуры низкой плотности или ткани с начесом на поверхности. Начес повышает уровень защиты на 12 %. Массовая плотность играет значимую роль, хотя взаимосвязь между плотностью и уровнем теплозащиты не прямо пропорциональна.

Комплексно оценить степень защиты спецодежды позволяют огневые полигонные, натурные или лабораторные испытания в камере. Наиболее доступными являются лабораторные испытания на специальных установках, появившихся в Швейцарии, Великобритании, США и других странах. Каждая из подобных установок имеет свои особенности, но по основным параметрам соответствует требованиям международного стандарта ISO 13506:2008 [30]. Одному из таких приборов компания-разработчик «Дюпон» дала название Thermo-Man.

Thermo-Man представляет собой установку, в центре которой помещен манекен взрослого человека. На нем размещены 122 датчика, фиксирующие проникающее через одежду тепло. Источником огня служат 12 пропановых горелок, установленных таким образом, чтобы при воздействии открытого пламени им оказался окутан весь манекен. Температура пламени составляет около 800 °С, а тепловой поток – 84 кВт/м². Испытания проходят при неподвижном манекене. Продолжительность огневого воздействия варьируется в зависимости от требований к одежде: от 4 секунд и дольше.

Информация, поступающая от температурных датчиков, обрабатывается специальной компьютерной программой, которая выдает на «теле человека» отметки локализации и степени возможных ожогов. Такой анализ проводится на основании данных, установленных группой ученых во главе с А. М. Stoll [19–21].

В Российской Федерации есть свой термоманекен, который установлен во Всероссийском научно-исследовательском институте противопожарной обороны (ВНИИПО). Он предназначен для испытаний специальной защитной одежды пожарного согласно ГОСТ Р 53264–2009 [31]. Однако он существенно отличается от установок других стран. Для моделирования очага возгорания используют 8 горелок, а сам манекен можно вводить и выводить из зоны горения пламени, вращать вокруг своей оси со скоростью до 10 оборотов в минуту. Количество датчиков теплового потока в российском стандарте не оговаривается. В результате теста испытатели получают не площадь и степень возможных ожогов, а не имеющие численного значения характеристики состояния человека: комфортное, тепло, боль, нестерпимая боль. Количественными характеристиками являются температура и тепловой поток

в подкостюмном пространстве.

Очевидно, что описанные выше установки отличаются и по конструкции, и по качеству обработки данных, поэтому сравнивать результаты этих систем не вполне корректно. Также необходимо отметить, что проверка спецодежды на термоустановках не входит в разряд обязательных испытаний.

В Республике Беларусь на данный момент нет установки подобной Thermo-Man.

В результате проведенного анализа требований к тканям и материалам защитной одежды пожарных, а также методов и средств их оценки можно отметить, что:

– наряду с традиционными для текстильного материаловедения показателями теплофизических свойств материалов и их пакетов действующими ТНПА введены специализированные показатели и методы их оценки. Оценка большинства показателей связана со значительными материальными и временными затратами. При проведении испытаний используется уникальное оборудование;

– оценка большинства теплофизических показателей материалов и их пакетов происходит только на качественном уровне и не содержит количественной оценки результатов испытания. Пакет материалов выдержал или не выдержал испытания. Следовательно, проведение сравнительного анализа уровня защиты двух, прошедших испытание пакетов материалов, не представляется возможным;

– показатель устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов отличает высокий уровень информативности, его оценка может производиться как для проб пакета материалов, так и для готового изделия без их повреждения. Однако согласно СТБ 1971-2009 он задается несколькими парами чисел: плотностью потока теплового воздействия и соответствующим минимальным временем переносимости. Очевидно, что в реальных условиях проведения аварийно-спасательных работ пожарный сталкивается с уровнем теплового воздействия, отличным, от указанного в стандарте, как по плотности теплового потока, так и времени его действия;

– использование степени теплового повреждения кожи в качестве критерия для оценки результатов испытаний по определению устойчивости пакета материалов к воздействию теплового потока, несомненно, повышает информативность результатов испытаний, но тогда испытания необходимо проводить при воздействии тепловых потоков большой плотности (более 40000 Вт/м^2), а это противоречит действующему стандарту. Также необходимо отметить, что такие испытания связаны с последующим разрушением образцов и дают возможность только предсказать ожог II степени с вероятностью $p = 0,5$.

1.4 Анализ методов оценки показателей качества материалов и их пакетов боевой одежды пожарных при эксплуатации

Во время эксплуатации боевой одежды пожарных ее материалы подвергаются воздействию различных факторов внешней среды: тепловые и механические, воды и агрессивных сред, а также климатические воздействия, которые приводят к необратимым изменениям структуры его волокон и ухудшению их свойств. Изменения структуры и свойств волокон непременно приводят к изменению физико-механических и теплофизических свойств материала. Глубокое и всестороннее изучение эксплуатационных свойств материалов и их пакетов, используемых при изготовлении БОП, позволит выявить резервы их эксплуатационной надежности, прогнозировать срок службы и, соответственно, повысить надежность и конкурентоспособность готового изделия.

Согласно СТБ 1971-2009 срок службы БОП – не менее двух лет от даты начала применения. В ходе эксплуатации после окончания аварийно-спасательных работ БОП подвергается внешнему осмотру и ремонту: БОП с незначительными повреждениями верхнего слоя (общей площадью до 0,8 дм²) ремонтируют в условиях пожарной части с использованием ремонтного комплекта, если БОП имеет значительные повреждения – дальнейшая эксплуатация ее запрещена [5].

Однако использование только визуального контроля неизбежно влечет за собой субъективность оценки показателей, определяющих качество материалов, и как следствие невозможность достоверно и объективно оценить эффективный срок их эксплуатации. К. Slater в работе [32] отмечает, что уровень разрушения текстильного материала не может быть напрямую связан с визуальными индикаторами повреждения ткани. Так как значения показателей качества текстильного материала в процессе его эксплуатации становятся ниже нормативных требований прежде, чем появляются визуально очевидные повреждения ткани. Это указывает на потребность в расширенном визуальном осмотре или других не визуальных методах выявления степени разрушения материала.

Следует отметить, что для анализа и контроля показателей структурных характеристик текстильных полотен наиболее широкое применение и распространение получили оптические методы и приборы. Основными преимуществами оптических методов являются их быстродействие, возможность проведения неразрушающих и бесконтактных измерений. Однако главным недостатком является отсутствие их серийного производства. Бурное развитие в последние десятилетия оптоэлектронной и компьютерной техники дало новый толчок для их использования при изучении прикладных вопросов текстильной отрас-

ли [33–35].

В патенте «Способ и устройство для контроля качества и испытания материала рабочей одежды, в частности одежды пожарных» [36] с целью определения возможных изменений и/или повреждений ткани, приводящих к снижению или потере защитных свойств, осуществляются три стадии испытания. Первая стадия испытаний предусматривает оптический контроль внешней поверхности ткани, вторая стадия – исследование отражательной способности флуоресцентных накладок, нанесенных на ткань и, наконец, третья стадия определяет способность ткани к теплоизоляции под действием ИК-излучения. Основным недостатком является использование дорогостоящего оборудования для проведения исследований.

Р. Thorpe [37] исследовал неразрушающими методами изменение цвета материала верха защитной одежды пожарных при тепловом воздействии и предложил использовать цветовое изменение ткани в качестве индикатора термической деструкции материала. В качестве оборудования для цифрового анализа цвета ткани им были рекомендованы обычный сканер, персональный компьютер и разработанное программное обеспечение в среде MATLAB для обработки данных. В ходе исследований автором была установлена взаимосвязь между изменением разрывной нагрузки и цвета материала верха защитной одежды пожарного от теплового воздействия. Однако в работе не рассматривалось влияние солнечного света, стирки и других воздействий на изменение цвета ткани.

Н. П. Лебедевой представлены результаты исследования изменения цвета параарамидных нитей технического назначения (русар, кевлар, тварон, лавсан) в результате воздействия атмосферных факторов в естественных условиях Северо-Западного региона России в течение до 180 сут весенне-летне-осеннего периода. Установлено потемнение окраски нитей, однако корреляции между изменением цвета и изменением их механических свойств не выявлено [38].

Таким образом, в настоящее время нет убедительных оптических методов для комплексной и однозначной оценки изменения показателей качества защитной одежды пожарных при эксплуатации.

В патенте [39] представлен способ оценки показателей теплозащитных свойств (теплопроводность, температуропроводность, тепловая активность, объемная теплоемкость, тепловое сопротивление) тканей и их пакетов, основанный на принципе нестационарного теплового режима: термометром сопротивления, ориентированным в направлении распространения тепла, осуществляют измерение интегральных температур в эталонном образце и в исследуемом материале. Однако данный способ не позволяет выполнять оценку теплозащитных свойств тканей и их пакетов в реальных условиях эксплуатации изделий из-за отсутствия мобильности и строго заданных условий проведения испытаний. Кроме

того, к недостаткам способа можно отнести большой расход электроэнергии и низкую производительность.

Изобретение [40] также может быть использовано для определения теплозащитных свойств материалов и пакетов одежды. Сущность изобретения заключается в измерении времени остывания аккумулятора тепла, помещенного внутрь материала, пакета одежды, в заданном интервале температур и определении суммарного теплового сопротивления образца. В качестве нагревательного элемента в предложенном решении используется аккумулятор тепла с теплоносителем в виде геля в герметичной упаковке. Применение данного способа обеспечивает получение теплозащитных характеристик материалов, пакетов одежды в реальных условиях эксплуатации, при различных температурах, влажности воздуха и скорости ветра. Предлагаемый способ универсален, так как позволяет производить оценку теплозащитных свойств не только материалов и пакетов одежды, но и готовых изделий различной объемной формы и конфигурации без их разрушения при подготовке проб. Кроме того, доступность и невысокая стоимость комплектующих позволяет использовать несколько устройств одновременно, что существенно сокращает время проведения испытаний, долговечность, простоту сборки и эксплуатации. Недостатком является то, что определение теплозащитных свойств материалов и пакетов одежды осуществляют в интервале температур 55–45 °С, в то время как стандарт регламентирует оценку теплопроводности пакета материалов защитной одежды пожарных при температуре от 50 °С до 150 °С.

Общим недостатком рассмотренных выше методов является оценка только общих (поверхностная плотность, разрывная нагрузка, коэффициент теплопроводности и т. п.) показателей качества тканей для изготовления специальной одежды, а специализированные (устойчивость к воздействию теплового потока, открытого пламени, температуры 300 °С и т. п.) показатели качества материалов и их пакетов не определяются.

Также необходимо отметить, что масштабных и систематических эксплуатационных испытаний по определению соответствия БОП нормативным требованиям проводятся крайне редко, так как определение большинства показателей качества защитной одежды связано с повреждением или разрушением образца, а используемые при ее изготовлении материалы имеют высокую стоимость.

Обзор литературных источников показал, что сведений по вопросам исследования эксплуатационных свойств БОП как в Республике Беларусь, так и в ближнем и дальнем зарубежье крайне мало.

T. L. Vogelwohl проводила изучение списанной защитной одежды пожарных. Она исследовала 20 комплектов БОП. Комплекты проверялись на соответствие требованиям стандарта для боевой одежды пожарного 1971 NFPA [18]. Было обнаружено, что некоторые из комплектов

удовлетворяют почти всем требованиям, а другие – не выдержали большинство нормативных испытаний. Некоторые показатели качества, такие как показатель теплозащитных свойств (тест ТРР) фактически улучшился, что приписывается увеличению толщины БОП, возможно в результате механических воздействий и стирки [37].

Интенсивная эксплуатация одежды (особенно это касается спец-одежды) приводит к ее загрязнению и, как следствие, к необходимости проведения частых стирок. Исследованиями [41–44] установлено, что основным параметром влияния стирки на теплозащитные свойства материалов для одежды является число стирок. Так, после 10 стирок в утепляющих материалах происходят изменения в структуре и толщине, что приводит к снижению теплового сопротивления материалов в зависимости от структуры на 0,9–44,3 %. Это обусловлено тем, что воздействие тепла и влаги способствует усадке материалов, их заметному уплотнению и, как следствие, потере теплоизолирующих свойств. К аналогичным выводам пришли исследователи [45], получившие экспериментальные данные о том, что теплоизолирующая способность пакетов материалов для теплой одежды после трех стирок ухудшилась на 20 %.

В работе [46] показаны исследования влияния стирки на разрывную нагрузку, поверхностную плотность и теплозащитные свойства (тест ТРР [18]) материалов, используемых при изготовлении БОП. Объектами исследования являлись: четыре вида материала верха, материал верха (четыре варианта) плюс подкладочный материал (двухслойные пакеты), материал верха (четыре варианта) вместе с теплоизоляционным и подкладочным материалом (трехслойные пакеты). В ходе исследования было установлено, что после 10-й стирки произошло:

- увеличение поверхностной плотности (на 1,8–2,6 %) и уменьшение разрывной нагрузки (на 5,3–21,2 %) для всех вариантов материала верха. Причиной этого может быть механическое воздействие стиральной машины и химикатов в моющих средствах, вызывающие разрушения волокон ткани;

- уменьшение показателей теплозащитных свойств (на 0,9–14,2 %) для всех исследованных типов материала верха и увеличения данного показателей для многослойных пакетов: на 26–51,4 % для двухслойных пакетов и на 2,4–31,1 % для трехслойных пакетов. Причиной этого может быть послойная конструкция пакета, так как взбивание тканей увеличивает между слоями пакета количество воздуха, который является хорошим изолятором.

Анализ литературных источников показал, что влияние таких эксплуатационных характеристик, как повышенная температура, светопогода, на изменение свойств волокон и нитей «Арселон-С» исследовано довольно подробно в работах Е. Н. Дресвяниной и М. Н. Михалко [47–49].

На основании данных из работ [47, 48] установлено, что нити «Арселон», «Арселон-С» выдерживают воздействие температур до 400 °С без значительных изменений размеров и протекания термоокислительных и термодеструктивных процессов. При температуре 430 °С начинается процесс термодеструкции полимера, интенсивное разложение начинается при температуре 450–470 °С. Наряду с высокими показателями термостойкости выявлено незначительное изменение размеров нитей, что особенно актуально при изготовлении и эксплуатации специальной защитной одежды. В пределах температуры 430–500 °С деформация не превышает 2 % для «Арселон» и 4 % для «Арселон-С».

Е. Н. Дресвянина указывает, что длительное воздействие температуры 250 °С не оказывает существенного влияния на механические свойства нитей «Арселон», «Арселон-С». Даже при воздействии в течение 300 часов нити сохраняют более 80 % прочности. Повышение температуры сопровождается потерей прочности [47, 48].

Данные Е. Н. Дресвяниной указывают на заметное влияние светопогоды, а именно агрессивное воздействие УФ-излучения, которое инициируется действием тепла и атмосферной влаги и приводит к значительному механическому и структурному старению нитей. Нити «Арселон» обладают удовлетворительной устойчивостью к действию видимого света. Данные по изменению механических свойств светостабилизированных нитей «Арселон-С» после воздействия искусственного освещения показали характерное их незначительное убывание [47, 48].

М. Н. Михалко исследовала влияние факторов светопогоды на кислородный индекс (КИ) нитей «Арселон» и «Арселон-С». Было установлено, что КИ нитей с самого начала экспонирования при воздействии УФ-излучения начинает повышаться и достигает максимальной величины при 40 ч. При дальнейшем экспонировании нитей (до 50 ч) он несколько уменьшается, но остается выше исходного значения. Повышение кислородного индекса происходит, вероятно, из-за увеличения транс-конформационных положений макромолекул при облучении, что обуславливает рост кристаллической упорядоченности и повышении плотности молекулярной структуры волокон [49].

В результате проведенного литературного и патентного обзора методов оценки показателей эксплуатационных свойств тканей и материалов для защитной одежды пожарных можно сделать следующие выводы:

- использование нормативного (визуального) контроля качества боевой одежды пожарных не позволяет достоверно и объективно оценить эффективный срок их эксплуатации. Расширенные методы визуального осмотра проводят оценку только общих показателей качества тканей одежды, при этом используется дорогостоящее оборудование;

- необходима разработка единых методов определения защитных и эксплуатационных свойств тканей и материалов для специальной

одежды. Это позволит установить нормы и количественные критерии основных свойств, а также осуществить контроль за существующим ассортиментом, что будет способствовать улучшению обеспечения потребности в качественной одежде специального назначения.

1.5 Основные направления совершенствования системы оценки теплозащитных свойств специальной защитной одежды пожарных

Проведенный обзор литературных источников показал, что сведений о закономерностях изменения свойств материалов СЗО пожарных при эксплуатационных воздействиях крайне мало. Необходимо исследовать не только изменение свойств материалов и их пакетов при воздействии различных факторов износа, но и выявлять их защитные возможности на стадии проектирования и оценить их надёжность. Существующие методы и средства оценки показателей не в полной мере отражают изменение защитных свойств готовых изделий в процессе эксплуатации.

Для внедрения современных инновационных материалов в производство и повышения конкурентоспособности готовой продукции существует острая потребность в разработке новых подходов к количественной оценке качества материалов СЗО пожарных и в создании соответствующих методов и средств измерения.

Анализ литературных источников и нормативно-технической документации позволяет отметить, что в настоящее время нет научно-обоснованной номенклатуры показателей качества тканей специального назначения, позволяющей комплексно оценивать СЗО пожарных по всем показателям, определяющим качество изделий с учетом опасных факторов пожара, отсутствуют стандартные методы определения показателей качества.

Нормативные показатели теплофизических и физико-механических свойств СЗО пожарных носят условный характер и определяются в упрощенных условиях, не соответствующих эксплуатационным по количеству и характеру изменения различных внешних воздействий и фактора времени.

Несовершенство нормативной базы, недостаток специальных методик исследований, отсутствие ряда требований и критериев оценки качества материалов, тканей и СЗО пожарных в целом не позволяет разрабатывать спецодежду высокого качества, обеспечивающую безопасные и эффективные условия работы в различных условиях. Необходим комплексный подход, учитывающий по возможности все показатели, характеризующие защитный уровень готового изделия.

Все это обуславливает необходимость научно обоснованного выбора номенклатуры и классификации показателей качества тканей специального назначения, разработки и совершенствовании методов их оценки, что позволит комплексно оценить изменения защитных свойств тканей и материалов СЗО пожарных в процессе эксплуатации, даст представление об их эксплуатационной надежности и, соответственно, позволит прогнозировать сроки эксплуатации готовых изделий.

Из множества поражающих факторов, действующих при тушении пожаров, наиболее часто к травматизму и гибели приводят воздействия высокой температуры окружающей среды, тепловых потоков, открытого пламени и контакт с нагретыми поверхностями. Поэтому теплофизические показатели используемых материалов и тканей являются наиболее важными при оценке эксплуатационных показателей комплекта СЗО пожарного.

Для всестороннего исследования теплофизических свойств материалов и тканей СЗО пожарного необходимо учитывать, что тепловое воздействие при тушении пожаров может быть:

- разным по типу воздействия (тепловой поток, открытое пламя, контакт с нагретыми поверхностями, высокая температура окружающей среды);
- различным по величине и потому вызывать неодинаковые реакции, в том числе опасные для здоровья пожарного (появление ожоговых травм);
- действовать в течение разного времени;
- с разной кратностью, то есть с разным числом чередующихся нагрузок и «отдыхов» после них.

В соответствии со сказанным выше тепловая нагрузка (воздействие) может сопровождаться последующей разгрузкой и отдыхом. Подобное воздействие может быть повторено много раз. Отсюда при определении теплофизических свойств можно ввести понятие испытательного цикла, при котором осуществляется последовательность действий: нагрузка – разгрузка – отдых.

Тогда, по аналогии с принятой в текстильном материаловедении классификацией характеристик механических свойств материалов [50], можно разделить характеристики теплофизических свойств СЗО пожарного по особенностям их получения. Характеристики, получаемые при осуществлении части испытательного цикла (например, при нагружении без разгрузки) следует отнести к «полуцикловым», получаемые в результате многократного воздействия ряда полных циклов – к «многоцикловым». Такие характеристики, получаемые в зависимости от особенностей осуществления испытательного цикла, будут описывать теплофизические свойства СЗО пожарных с разных сторон [51, 52].

«Полуцикловые» характеристики теплофизических свойств СЗО пожарного определяют отношение материалов и тканей к однократному

тепловому воздействию и смогут охарактеризовать их предельные теплозащитные возможности. Основным критерием, с помощью которого возможно комплексно оценить качество материалов и тканей, защитных пакетов и СЗО пожарного в целом, является время защитного действия. Тогда для получения предельных теплозащитных характеристик необходимо провести исследования изменения максимального времени безопасной эксплуатации СЗО пожарного в зависимости от уровня теплового воздействия.

«Многоцикловые» характеристики теплофизических свойств СЗО пожарного оценят устойчивость и долговечность теплофизических свойств материалов и тканей при многократных тепловых воздействиях различного уровня, действие которых гарантированно не приводит к возникновению видимых признаков деструкции материалов пакета. Критериями оценки времени безопасной эксплуатации СЗО пожарного являются температура и плотность теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов в течение испытания. Тогда для оценки устойчивости и долговечности теплофизических свойств можно провести исследования изменения температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета СЗО пожарного при циклическом тепловом нагружении.

Практическое использование вышеуказанных показателей позволит всесторонне оценить теплофизические свойства СЗО пожарного, с точки зрения не только качества изготовления, но и произвести оценку изменения ее теплофизических свойств в процессе эксплуатации.

РЕЗЮМЕ

1. Боевая одежда пожарных является важнейшим и самым массовым по применяемости средством индивидуальной защиты пожарных. Комплексная оценка показателей эксплуатационных свойств боевой одежды пожарных является наиболее важным элементом в обеспечении безопасности пожарного при проведении работ по тушению пожаров и связанных с ними аварийно-спасательных работ.

2. Установлено, что пакет текстильных материалов, используемых для изготовления боевой одежды пожарных, должен состоять из материала верха, водонепроницаемого слоя, теплоизоляционной подкладки и подкладочной ткани, допускается совмещение водонепроницаемого слоя с теплоизоляционной подкладкой или материала верха с водонепроницаемым слоем. В настоящее время существует достаточно широкий ассортимент материалов отечественного и зарубежного производства, пригодных для изготовления защитной одежды пожарных.

3. Проведен анализ номенклатуры показателей, характеризующих теплофизические свойства пакетов материалов боевой одежды пожарных. Установлено, что полученные в условиях нормативных испытаний показатели теплофизических свойств пакетов материалов БОП обладают недостаточной информативностью, так как могут при сравнении с базовыми значениями характеризовать только качество изготовления с точки зрения соответствия стандарту, и не позволяют осуществить прогноз показателей теплозащитных свойств готового изделия в процессе эксплуатации.

4. Показано, что проведение исследований, направленных на повышение информативности, снижение уровня временных и материальных затрат на проведение испытаний по оценке показателей теплозащитных свойств материалов боевой одежды пожарных, а также прогнозирование их изменения в процессе эксплуатации является актуальной научной задачей.

ГЛАВА 2

ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МНОГОСЛОЙНОМ ПАКЕТЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ БОЕВОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ ПРИ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

При проектировании боевой одежды пожарных возникает необходимость в формировании пакетов материалов, отвечающих нормативным требованиям. Основными нормативными критериями для оценки показателей теплозащитных свойств БОП при тепловом воздействии являются значения температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов защитной одежды пожарных, которые и определяют время потенциально безопасной эксплуатации при тепловом воздействии.

Исследование теплофизических свойств отдельных материалов, входящих в состав БОП, не позволяет определить уровень защитных свойств всего пакета, установить распределение температурных полей внутри него и, соответственно, осуществить прогноз времени безопасной эксплуатации защитной одежды при различном уровне теплового воздействия. Экспериментальный подбор материалов для формирования пакета материалов защитной одежды, используемый в настоящее время, связан со значительными временными и материальными затратами на проведение испытаний по определению соответствия его нормативным требованиям.

На основании выше изложенного возникает необходимость в разработке аналитических методов расчета температурного поля в пакете материалов БОП при тепловом воздействии в ходе нормативных испытаний. Исследование процессов переноса тепла внутри многослойного пакета материалов БОП позволит:

- 1) осуществить прогноз времени безопасной эксплуатации БОП при тепловом воздействии различного уровня;
- 2) обосновать рациональную структуру пакета материалов для изготовления защитной одежды пожарных;
- 3) произвести оценку максимальной температуры внешней поверхности БОП, при которой не происходит разрушение материалов пакета.

Однако сложность и громоздкость решений задач теплопереноса, связанные с многослойностью пакета, несимметричностью граничных условий, нестационарностью процесса теплообмена, непостоянством показателей теплофизических свойств материалов, приводят к невозможности практического использования полученных решений. На сегодня получены решения лишь для отдельных задач теплопереноса в ма-

териалах специальной защитной одежды пожарных от повышенных тепловых воздействий [53–55].

Целью исследований, представленных в данной главе, является разработка простого в физическом понимании и приемлемого в практическом использовании аналитического метода, который бы позволял адекватно рассчитать распределение температуры в многослойном пакете при тепловом воздействии и на основании полученных данных проектировать его состав.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие основные задачи:

- теоретический анализ процесса теплопереноса в многослойных пакетах материалов боевой одежды пожарных в условиях нестационарной нелинейной теплопроводности при несимметричных граничных условиях;

- разработка алгоритма расчета распределения температуры в многослойном пакете материалов при испытаниях на устойчивость к тепловому воздействию, с учетом зависимости показателей теплофизических свойств материалов пакета от температуры;

- проведение комплекса экспериментальных исследований распределения температурных полей в многослойных пакетах материалов при нормативных испытаниях на устойчивость к тепловому воздействию.

2.1 Методы расчета процесса теплопередачи в условиях нестационарной теплопроводности

2.1.1 Особенности переноса тепла через текстильные материалы

Из классической теории теплопроводности [56, 57] известно, что тепловой поток, проходящий через какое-либо физическое тело, можно условно разделить на три составляющие: теплопроводность (кондукция), конвекция и тепловое излучение. В твердых непрозрачных, однородных телах тепло переносится только за счет теплопроводности самих частиц тела. Текстильные материалы в отличие от твердых однородных тел имеют более сложную структуру и согласно классификации академика А. В. Лыкова относятся к группе капиллярно-пористых тел, где слои твердого вещества (волокон) чередуются с пустотами (порами), заполненными газовой составляющей (в данном случае воздухом). Передача тепла в таких материалах осуществляется не только за счет теплопроводности частиц самого материала, но и посредством молекулярной теплопроводности газа, конвекцией и тепловым излучением [58].

Доля каждого вида теплопереноса в общем объеме тепла, про-

шедшего через текстильный материал, зависит от совокупности определяющих факторов: теплопроводности материала волокон и воздуха, температуры и давления окружающего воздуха, температуры и состояния граничных поверхностей, структурных параметров материала.

В исследованиях, представленных в работах [41, 59–61], установлено, что в текстильных материалах, используемых в качестве утеплителей для одежды зимнего и осенне-весеннего периодов носки, перенос тепла теплопроводностью волокон материала значительно меньше, чем перенос тепла теплопроводностью воздуха, и зависит от объемной доли волокон в материале. J. R. Martin, G. E. R. Lamb показали, что в нетканых материалах с объемной долей волокон 10–19 % теплотеплоперенос посредством теплопроводности волокон составляет лишь 6–7 % от общего количества тепла, прошедшего через материал [60]. Результаты исследований, представленные в работах [62, 63], свидетельствуют о том, что вклад теплопроводности волокон в общий объем теплотеплопереноса может быть значимым только в текстильных материалах с объемной долей волокон более 20 % [62] и для материалов, имеющих плотность более 100 кг/м^3 [63].

Другой вид теплотеплопереноса в текстильных материалах – перенос тепла излучением – зависит от толщины материала, а также объемной доли волокон в материале и их диаметре. Большинство исследователей [41, 64–66] отмечают, что вклад лучистой составляющей в общий процесс теплотеплопереноса через плотные ткани незначителен. Результаты исследований теплотеплопереноса в хлопчатобумажной ткани, проведенные И. П. Корнюхиным [66], свидетельствуют, что доля переноса тепла излучением составляет не более 0,15 %. А приближенный метод расчета лучистой составляющей эффективного коэффициента теплопроводности теплоизоляционных систем с перфорированными экранами [65] показал, что при совпадении просветности ткани со степенью перфорирования экранов, вклад переноса тепла излучением составил не более 0,06 % от общего количества тепла, прошедшего через материалы.

Полученные в результате экспериментальных исследований данные [63] показали, что в нетканых волокнистых материалах, имеющих высокую плотность (более 100 кг/м^3) и волокна малой линейной плотности, перенос тепла излучением не более 10 % от общего потока тепла. Так для утепляющих материалов, которые обладают высокой плотностью, вклад теплового излучения составляет около 3 % от общего количества тепла [62].

Столь незначительный вклад теплового излучения в общий поток тепла, прошедший через плотные материалы, можно объяснить тем, что, во-первых, диаметр волокон, а тем более пряжи, существенно больше длины волны теплового излучения, и волокна (пряжа) практически не пропускают тепловые лучи. Во-вторых, сюда необходимо добавить эффект многократного рассеивания теплового излучения волокна-

ми ткани [41, 61, 66]. Так как нити в ткани располагаются достаточно плотно друг к другу, то можно предположить, что основной вклад в перенос тепла излучением принадлежит сквозным порам между нитями.

Из вышеизложенного следует, что в плотных и тонких материалах тепловое излучение не является существенным по сравнению с теплопроводностью воздуха и волокнистой массы материала. И, наоборот, в высокопористых материалах с объемной долей волокон, не превышающей 1–2 %, и имеющих большую толщину, вклад лучистой составляющей может быть сопоставим с теплопроводностью воздуха [41, 62].

В работах [41, 67] показаны результаты исследования способности текстильных материалов поглощать тепловое излучение. Установлено, что коэффициент поглощения текстильного материала зависит от плотности и влажности материала. С возрастанием поверхностной плотности материала увеличивается его коэффициент поглощения, однако при поверхностной плотности более 100 г/м² возрастание замедляется.

Согласно [56–58], конвективным переносом тепла в капиллярно-пористых телах в подавляющем большинстве случаев можно пренебречь, так как очень малые размеры пор препятствуют возникновению конвективных токов под действием температурного градиента. Это справедливо для материалов с размерами частиц не более 4–6 мм и размерами пор менее 10 мм, а большинство реальных текстильных систем имеет размеры частиц (волокон) и пор меньше указанного. Эти заявления подтверждены результатами работ [41, 61, 62, 68], в которых экспериментально доказано, что внутренняя конвекция отсутствует даже в высокопористых текстильных материалах.

Что касается конвекции с поверхности материалов или в воздушной прослойке, находящейся между слоями материалов, то можно с уверенностью сказать, что этот вопрос достаточно хорошо освещен в специальной литературе [68–70]. В этих работах представлены закономерности конвективного переноса тепла, расчетные формулы, позволяющие оценить значения коэффициента теплоотдачи с поверхности материалов.

При проведении теплотехнических расчетов одежды используются разнообразные модели текстильных материалов. Так, в литературе широко распространена модель ткани, представленная в виде сплошной однородной стенки (пластины) с постоянными теплофизическими свойствами, где ширина и длина стенки несоизмеримо велики по сравнению с ее толщиной [71–76].

Многослойные текстильные материалы (пакеты) при тепловых расчетах чаще всего представлены в виде *n*-слойной плоской стенки [73]. Использование такой модели не совсем корректно, поскольку многослойная стенка предполагает наличие идеального контакта между соприкасающимися поверхностями, чего нельзя сказать о реальном пакете

текстильных материалов, где слои неплотно прилегают друг к другу, образуя воздушные зазоры [77, 78]. Однако если термическое сопротивление границы раздела существенно меньше наибольшего по значению сопротивления переносу теплоты любого из контактирующих тел, то скачком температуры на границе раздела можно пренебречь [79].

Необходимо отметить, что все описанные выше исследования проводились при стационарном тепловом режиме с учетом постоянства теплофизических коэффициентов текстильных материалов.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований распределения температурных полей в материале верха специальной защитной одежды пожарных от повышенных тепловых воздействий в условиях нестационарной теплопроводности при граничных условиях третьего рода приведены в [53]. К недостаткам предложенной автором модели теплопереноса можно отнести постоянство теплофизических коэффициентов материалов.

Известно, что коэффициент теплопроводности зависит от температуры. Для многих металлов он уменьшается с ростом температуры по линейному закону. Для газов этот коэффициент увеличивается с повышением температуры и от давления практически не зависит, за исключением очень высоких (более 2000 атм.) и очень низких (менее 10 мм рт. ст.). С повышением температуры для большинства жидкостей коэффициент теплопроводности уменьшается, исключение составляют вода и глицерин [57].

Число работ, посвящённых исследованию зависимости теплопроводности текстильных материалов от температуры, сравнительно невелико. Согласно результатам экспериментальных исследований, выполненных отечественными специалистами, теплопроводность всех исследованных текстильных материалов линейно увеличивается с увеличением температуры. Коротко остановимся на наиболее важных работах.

Теплопроводность текстильных полотен с повышением температуры увеличивается. Так, по данным Я. А. Школьниковой, коэффициент теплопроводности стекловолокна и других изоляционных материалов с повышением температуры изменяется по формуле [80]

$$\lambda = \lambda_0 + \beta t,$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности при $t = 0$ °С, Вт/(м·К); β – эмпирический коэффициент; t – текущая температура материала, °С.

По данным Л. Ф. Янкелева, в интервале температур от 30 до 75 °С коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов изменяется незначительно. При увеличении температуры свыше 75 °С происходит заметное увеличение λ [81].

В работе [82] представлены результаты аналитических и экспе-

риментальных исследований различных материалов и тканей для спецодежды пожарных, а также показана графическая зависимость коэффициента теплопроводности термостойких текстильных материалов («Арселон», «Силотекс-97», «Номекс» Дельта Т Рип Стоп) от температуры. Зависимость для всех материалов носит линейный характер. Авторами определено, что коэффициент теплопроводности для исследованных материалов при увеличении температуры от 25 до 50 °С увеличивается более чем на 20 %, а при дальнейшем подъёме температуры до 100 °С – более чем на 40 %.

Таким образом, игнорирование изменения теплофизических характеристик текстильных материалов защитной одежды пожарных от температуры может привести к недействительной оценке их теплозащитных свойств и привести к возникновению производственных травм.

Анализ литературных источников, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям процесса переноса тепла через капиллярно-пористые тела, позволяет принять следующие положения:

– теплоперенос у материалов, имеющих волокнистую (нетканые материалы на основе волокнистых холстов) и сетчатую (ткани, трикотаж, нетканые ните- и тканепошивные материалы) структуры, осуществляется тремя видами теплопередачи: теплопроводностью (кондукцией) твердого вещества волокон и молекул газа (воздуха), конвекцией воздуха в порах материала и тепловым излучением в порах и между волокнами и нитями материала. Результаты, приведенные в литературе, свидетельствуют о том, что в плотных тканях основная роль в передаче тепла принадлежит кондукции воздуха и волокон, а роль излучения и конвективного переноса тепла малы;

– при проведении теплотехнических расчетов наиболее часто применяется модель ткани в виде плоской однородной стенки, реже используются модели системы с упорядоченными элементами или в виде перфорированных экранов. Пакет материалов представляется в виде многослойной стенки;

– на настоящий момент отсутствует метод расчета, который с большой степенью достоверности описывал бы процесс теплопереноса в многослойном пакете материалов защитной одежды пожарных при неустановившемся (нестационарном) тепловом режиме с учетом изменения показателей теплофизических свойств от температуры.

2.1.2 Анализ методов решения уравнений теплопроводности

При разработке и создании новых многослойных пакетов защитной одежды пожарных для целенаправленного влияния на улучшение их теплозащитных свойств необходимо детальное изучение теплового

состояния этих пакетов при различных условиях эксплуатации. Наиболее продуктивным способом решения этой задачи является комплексное теоретико-экспериментальное исследование процесса теплопередачи через многослойный пакет материалов в условиях нестационарной теплопроводности. Следует сказать, что проведение экспериментальных исследований для прогноза теплового состояния проектируемых пакетов не всегда эффективно ввиду многопараметричности и длительности моделируемых процессов теплопередачи. В большей степени эти исследования целесообразны для получения экспериментальной информации по определению характеристик теплообмена на поверхностях пакета. На конечном этапе исследований данные экспериментов необходимы для проверки адекватности математических моделей и их верификации. Адекватные математические модели для решения задач распределения температурных полей в многослойном пакете в условиях нестационарной теплопроводности могут быть реализованы только с помощью эффективных методов расчета и быстродействующей компьютерной техники.

Основным средством изучения динамики распространения тепла в твердых телах служит аналитическая теория теплопроводности. Главная цель таких исследований – нахождение температурного поля внутри объема при известных краевых условиях.

Система дифференциальных уравнений теплопереноса вместе с краевыми условиями является математической моделью реального процесса. Решение этой системы позволяет получить полную картину распределения тепла в теле с течением времени и дать анализ кинетики и динамики процесса. С этой точки зрения аналитические решения, как самые точные, выгодно отличаются от других методов решения.

К основным аналитическим методам решения уравнений теплопроводности относятся: метод разделения переменных, метод функций источников, метод тепловых потенциалов (классические методы) и методы интегральных преобразований [83, 84].

Метод разделения переменных, или метод Фурье, применим для тел конечных размеров и состоит в том, что решение отыскивается в виде частных решений, удовлетворяющих однородным граничным условиям. К недостаткам метода разделения переменных можно отнести: невозможность применения для полуограниченных и неограниченных тел; невозможность непосредственного применения в случае неоднородных граничных условий, которые вначале должны быть приведены к однородным, что не всегда можно сделать; значительные трудности, связанные с решением краевых задач при граничных условиях четвертого рода [83, 84].

Метод функций источников, или функций Грина, позволяет решать краевые задачи при неоднородных краевых условиях как для конечных, так и для бесконечных тел. Достоинством метода функций

Грина является его универсальность, позволяющая применять его для решения задач в общей постановке: на конечном и бесконечном интервалах, при неоднородных граничных и начальных условиях и для неоднородных уравнений; а недостатком является то, что построение функции Грина требует определенной изобретательности и в некоторых случаях трудновыполнимо [83, 84].

Метод тепловых потенциалов незаменим для решения задач с подвижными границами, с переменным коэффициентом переноса и т. п. Одним из достоинств метода тепловых потенциалов является то, что он позволяет сводить решение дифференциального уравнения параболического типа к интегральному уравнению, которое более удобно для проведения числовых расчетов. К недостаткам метода следует отнести его сложность и громоздкость, а также невозможность его непосредственного применения в случае неоднородных начальных условий, которые вначале должны быть сведены к однородным [83, 84].

Классические методы решения краевых задач, описанные выше, обладают рядом недостатков: они требуют определенной изобретательности, дают решения, малопригодные для числовых расчетов [83, 84].

Методы интегральных преобразований (например, интегральное преобразование Лапласа) обладают рядом преимуществ перед классическими методами: они стандартны, позволяют получать решения в удобном для расчета виде (например, для малых и больших значений независимой переменной); использование таблиц изображения функций ускоряет и упрощает процесс нахождения решения. Однако наряду с несомненными достоинствами интегральные преобразования имеют общий существенный недостаток: они применимы лишь к линейным уравнениям [83, 84].

Что касается аналитических методов решения нелинейных задач теплопроводности, то их практически не существует. Это приводит к необходимости использования численных методов решения, среди которых все возрастающее значение приобретают разностные методы и их сочетание с другими численными и аналитическими методами [85], а также метод конечных элементов [86].

Метод конечных элементов начал интенсивно развиваться с середины 60-х годов и стал сейчас достаточно эффективным способом численного решения ряда задач для уравнений в частных производных, в особенности для эллиптических нестационарных уравнений. Он удобен для программирования и позволяет учитывать дополнительную информацию о решаемой задаче в тех случаях, когда удается получить обоснование его применимости. Однако метод конечных элементов недостаточно разработан для нестационарных нелинейных задач. Кроме того, главным недостатком этого метода, как и любого вариационного метода, является сложность получения априорных оценок. Проверку надежности метода можно осуществлять пока лишь апробированием

каждой программы на точных решениях [84].

Исследованию динамики распространения тепла в многослойных телах посвящено ряд работ как отечественных, так и зарубежных исследователей.

Можно выделить работы [87–89], в которых представлены стационарные модели для двух- и трехслойных систем. В качестве методов решения были применены: разделение переменных [87], конечные интегральные преобразования [88], метод функций Грина [89]. Стационарные модели для многослойных систем, полученные методом интегральных преобразований, представлены в [90].

В. С. Новиков применял конечные интегральные преобразования и функции Грина для решения задач нестационарного теплопереноса для однослойных тел с теплофизическими параметрами, зависящими от времени [91, 92].

Двух- и трехслойных модели линейного нестационарного теплопереноса представлены в [93–97]. Для решения использовались следующие методы решения: интегральное преобразование Лапласа по времени [93, 94], численные [95, 96], метод тепловых потенциалов [97].

В исследованиях, посвященных многослойным моделям нестационарного теплопереноса, для решения краевых задач использовались методы: преобразование Лапласа по времени [98, 99], интегральных преобразований по пространственным координатам [100, 101], численные [102, 103], метод функций Грина [104, 105].

При моделировании температурных полей для многослойных моделей необходимо решать систему уравнений теплопроводности для каждого слоя и обязательно сопоставлять решения на границе слоев, используя граничные условия четвертого рода. Вследствие этого математическая модель получается слишком громоздкой и сложной. Распределения тепла в теле можно описать значительно проще при условии, что сложная многослойная модель будет преобразована к эквивалентной однослойной. Например, в работах В. А. Макагонова [106], Б. Ф. Шкурко и В. П. Начаева [107] приводится инженерный метод расчета плоских многослойных тел, однако предложенный авторами метод не является универсальным, не содержит четкого алгоритма и при некоторых условиях дает значительную погрешность вычисления. В работах [108, 109] разработан алгоритм приведения многослойных моделей к однослойным на основании равенства температурных полей. Общим недостатком данного подхода для моделирования температурных полей многослойных тел является получение значений лишь близких к действительному распределению температуры.

Необходимо отметить, что в рассмотренных выше работах [93–109] теплофизические свойства материала отдельных слоев тела полагались постоянными при тепловом воздействии и, соответственно, уравнения теплопереноса рассматриваемых моделей всегда носили линей-

ный характер. Но при моделировании температурных полей для текстильных полотен, используемых для защитной одежды пожарных, уравнение теплопереноса в общем случае, с учетом данных из п. п. 2.1.1, будет нелинейным, так как практически все теплофизические характеристики изменяются с течением времени, поскольку зависят от температуры. Согласно предложенной в [110] классификации нелинейных задач теплопереноса уравнения, в которых коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость материала зависят от температуры, относят к задачам с нелинейностью первого рода или «внутренней нелинейностью».

В работах [111] рассмотрены двухслойные, а в [112–114] – многослойные модели теплопереноса с «внутренней нелинейностью». Решение двухслойных и многослойных задач осуществлялось, соответственно, аналитико-численными методами и численными методами.

Использование компьютерной техники часто позволяет свести нелинейную задачу к линейной. Если использовать зональный метод расчета [115–118], разделив весь процесс на n элементарных микропроцессов, в пределах каждого из которых все теплофизические параметры материалов могут считаться постоянными и одинаковыми во всем теле, а исходными данными для задания новых (начальных) значений будет являться температура материала в конце каждого из микропроцессов, тогда нелинейную задачу теплопереноса можно свести к совокупности n линейных задач. В этом случае при решении нелинейных задач теплопроводности для многослойных тел может быть использован комбинированный подход, заключающийся в том, что в начале каждого микропроцесса получают аналитическое решение для задач каждого слоя пакета, а затем весь процесс поэтапно просчитывается на ЭВМ. При этом отдельные задачи численно сопрягаются друг с другом. Такой подход часто более эффективен, чем непосредственное численное решение нелинейной задачи [117, 118]. Аналитические решения задач для отдельных слоев могут быть получены методом интегрального преобразования Лапласа.

2.2 Зональный метод расчета процесса теплопереноса в многослойном пакете материалов боевой одежды пожарных

2.2.1 Физико-математическая постановка задачи о теплопередаче через многослойный пакет материалов боевой одежды пожарных в условиях нестационарной теплопроводности при несимметричных граничных условиях

Устойчивость пакета материалов БОП к воздействию теплового потока определяют согласно СТБ 1971-2009 «Одежда пожарных боевая.

Общие технические условия» [5].

Анализ структуры пакета материалов БОП, а также условий проведения испытаний позволяет сформулировать следующие допущения:

– материалы пакета рассматриваются как твердое непрозрачное, однородное тело;

– на границе раздела слоев происходит контактный идеальный теплообмен (термическое сопротивление в зоне контакта равно нулю).

Вследствие того, что ширина и длина материалов пакета несоизмеримо велики по сравнению с толщиной, то их можно рассматривать как неограниченные пластины [119], а процесс определения устойчивости пакета материалов к воздействию теплового потока можно представить как нестационарный процесс теплопроводности в многослойной пластине при воздействии теплового потока с постоянной плотностью ($q_{\text{п}} = \text{const}$).

Тепловая схема пакета материалов БОП в ходе нормативных испытаний на устойчивость к тепловому воздействию представлена на рисунке 2.1.

На наружную поверхность многослойной пластины воздействует тепловой поток $q_{\text{п}}$, внутренняя поверхность граничит с окружающей средой $T_{\text{с}}$. Для каждого слоя известны численные значения коэффициентов теплопроводности $\lambda_i(t_i)$ и температуропроводности $a_i(t_i)$, а также их толщина R_i .

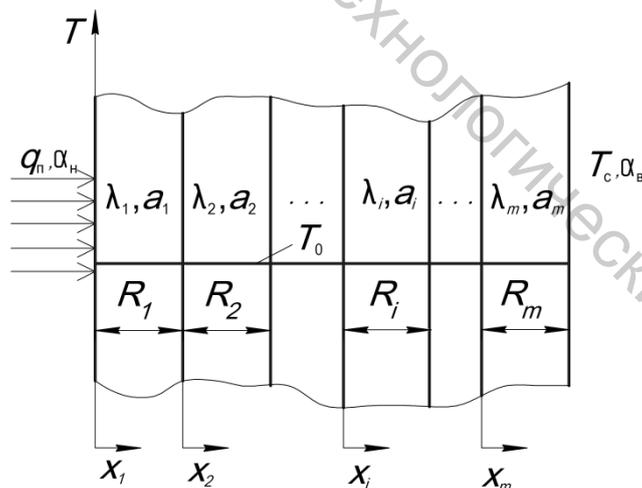


Рисунок 2.1 – Тепловая схема пакета материалов в ходе испытаний на устойчивость к тепловому воздействию

Система дифференциальных уравнений теплопроводности для многослойной пластины имеет следующий вид [57, 120]:

$$\frac{\partial T_i(x_i, \tau)}{\partial \tau} = a_i(T_i) \cdot \frac{\partial^2 T_i(x_i, \tau)}{\partial x_i^2}, \quad (0 < x_i < +R_i; i = 1, \dots, m), \quad (2.1)$$

где T_i – температура i -го слоя, К; i – номер слоя; x_i – пространственная координата в декартовой системе, м; τ – время, с; $a_i(T_i)$ – коэффициент температуропроводности i -го слоя, как функция температуры, м²/с; R_i – толщина i -го слоя, м.

На границе сопряжения слоев заданы граничные условия четвертого рода, исходя из равенства тепловых потоков и температур (термическое сопротивление в зоне контакта равно нулю):

$$\begin{cases} \lambda_{i-1}(T_{i-1}) \cdot \frac{\partial T_{i-1}(R_{i-1}, \tau)}{\partial x_{i-1}} = \lambda_i(T_i) \cdot \frac{\partial T_i(0, \tau)}{\partial x_i}, & (i = 2, \dots, m), \\ T_{i-1}(R_{i-1}, \tau) = T_i(0, \tau), & (i = 2, \dots, m), \end{cases} \quad (2.2)$$

где $\lambda_i(T_i)$ – коэффициент теплопроводности i -го слоя, как функция температуры, Вт/(м·К).

Оценка показателей теплозащитных свойств БОП производится при воздействии на ее наружную поверхность теплового излучения с постоянной поверхностной плотностью [5]. Часть падающего теплового излучения поглощается материалом верха БОП, а другая – отражается от его наружной поверхности. При этом вследствие нагрева материала происходит теплоотдача с наружной поверхности материала верха тепловой энергии в виде конвекции. Таким образом, баланс тепла на наружной поверхности многослойной пластины сведен к следующему граничному условию [4]:

$$-\lambda_1(T_1) \cdot \frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial x_1} = A \cdot q_n - \alpha_n \cdot T_1(0, \tau), \quad (2.3)$$

где A – интегральная поглощательная способность наружного слоя; q_n – плотность потока теплового воздействия, Вт/м²; α_n – коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности многослойной пластины, Вт/(м²·К).

Коэффициент теплоотдачи характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Он численно равен количеству теплоты, отдаваемой (или воспринимаемой) единицей поверхности в единицу времени при разнице температур между поверхностью тела и окружающей средой в один градус. Коэффициент теплоотдачи зависит от многих факторов, но при решении задач теплопроводности его, как правило, принимают величиной постоянной [121].

На внутренней поверхности m -слойной пластины происходит теплообмен с окружающей средой, который определяется граничными условиями третьего рода:

$$-\lambda_m(T_m) \cdot \frac{\partial T_m(R_m, \tau)}{\partial x_m} = \alpha_b \cdot (T_m(R_m, \tau) - T_c), \quad (2.4)$$

где α_b – коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности многослойной пластины, Вт/(м²·К); T_c – температура окружающей среды, К.

Уравнение начальных условий имеет вид:

$$T_i(x_i, 0) = T_0, \quad (i = 1, \dots, m). \quad (2.5)$$

Система дифференциальных уравнений теплопроводности (2.1) вместе с граничными (2.2–2.4) и начальными (2.5) условиями являются математической моделью реального процесса испытаний пакета БОП на соответствие нормативным требованиям. Решение этой системы уравнений позволит получить картину распределения тепла в многослойном пакете материалов и провести анализ кинетики и динамики процесса теплопереноса в нем.

Так как система уравнений, описывающая процесс теплопереноса в многослойной пластине, является нелинейной (в силу того, что коэффициенты теплопереноса каждого слоя непостоянны и зависят от температуры), то получение единого аналитического решения задачи теплопереноса практически невозможно. Вследствие этого для решения поставленной задачи предлагается использовать зональный метод решения краевых задач теплопереноса [116–118]. Сущность данного метода состоит в том, что весь процесс теплопередачи разбивается на множество малых временных интервалов, в пределах каждого из которых предполагается, что постоянны коэффициенты теплопереноса в слоях и плотности теплового потока через соприкасающиеся поверхности слоев, а также одинакова температура на стыках слоев, то есть на стыках слоев наблюдается идеальный тепловой контакт, но граничные условия четвертого рода на стыке слоев заменяются условиями первого и второго рода, что облегчает решение задачи.

Таким образом, общая задача для m -слойной пластины разбивается на три автономные задачи:

- для наружного слоя ($i = 1$): теплопередача в неограниченной пластине с граничными условиями (2.3) на левой границе, первого рода – на правой границе, неравномерными начальными условиями и постоянными теплофизическими свойствами (рис. 2.2 а);

- для промежуточных слоев ($i = 2, \dots, m-1$): теплопередача в неограниченной пластине с граничными условиями второго рода на левой границе, первого рода – на правой границе, неравномерными начальными условиями и постоянными теплофизическими свойствами (рис. 2.2 б);

- для внутреннего слоя ($i = m$): теплопередача в неограниченной

пластине с граничными условиями второго рода на левой границе, (2.4) – на правой границе, неравномерными начальными условиями и постоянными теплофизическими свойствами (рис. 2.2 в).

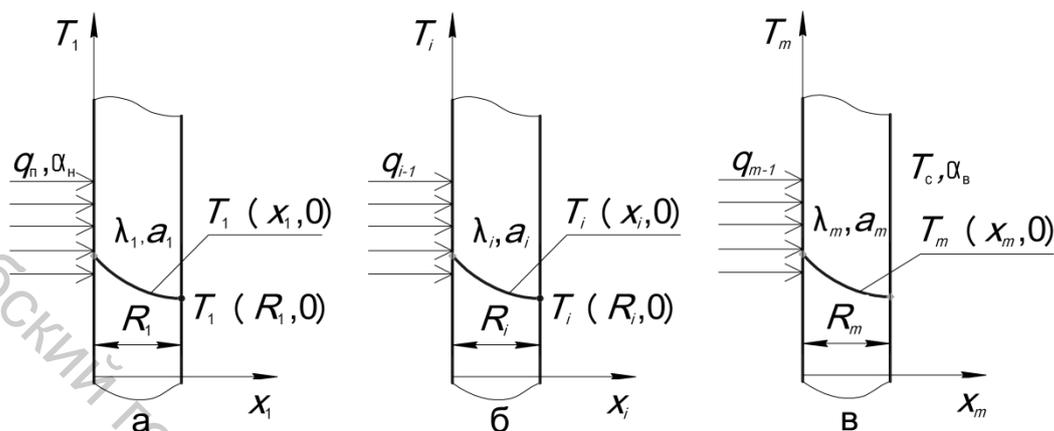


Рисунок 2.2 – Тепловая схема для отдельных слоев пакета материалов:
 а – для наружного слоя m -слойной пластины ($i = 1$),
 б – для промежуточного слоя m -слойной пластины ($i = 2, \dots, m-1$),
 в – для внутреннего слоя m -слойной пластины ($i = m$)

Общее решение задачи нестационарной теплопроводности для многослойного пакета материалов можно получить в результате сопряжения этих аналитических решений задач для отдельных слоев пакета на каждом временном интервале путем поэтапного просчета.

2.2.2 Аналитические решения задач теплопередачи для наружного, промежуточных и внутреннего слоев пакета материалов боевой одежды пожарных в условиях нестационарной теплопроводности

Для решения задачи нестационарного теплопереноса для наружного слоя пакета материалов БОП использовался метод интегральных преобразований Лапласа, который обладает рядом преимуществ перед классическими методами интегрирования дифференциальных уравнений и перед некоторыми другими методами интегральных преобразований [57]:

- процесс применения интегрального преобразования Лапласа однотипен для задач самого различного характера и различных форм тела;
- позволяет решать задачи при граничных условиях первого, второго, третьего и четвертого родов, без введения каких-либо новых допущений или преобразований;
- наличие большого числа простых теорем позволяет получить

наиболее подходящие результаты для конкретной ситуации, в частности, получать решения в форме, удобной для расчета при малых и больших значениях времени;

– эффективность решения разнообразных задач методом преобразования Лапласа в значительной мере усиливается наличием весьма подробных таблиц изображений.

Условие задачи для наружного ($i = 1$) слоя пакета сформулировано следующим образом: теплопередача в неограниченной пластине с граничными условиями (2.5) на левой границе и первого рода на правой границе слоя и неравномерными начальными условиями. Начало координат – на левой границе слоя (рис. 2.2 а).

Математически задача теплопроводности для первого слоя можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial T_1(x_1, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \cdot \frac{\partial^2 T_1(x_1, \tau)}{\partial x_1^2}, \quad (\tau > 0; 0 \leq x_1 \leq R_1). \quad (2.6)$$

Граничные условия:

$$-\lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1(0, \tau)}{\partial x_1} = A \cdot q_n - \alpha_n \cdot T_1(0, \tau), \quad (2.7)$$

$$T_1(R_1, \tau) = T_1(R_1, 0) = T_{1,R}. \quad (2.8)$$

Начальные условия:

$$T_1(x_1, 0) = T_{1,0}(x_1). \quad (2.9)$$

На основании теоремы подобия Кирпичева-Гухмана [122] для уменьшения числа аргументов и, тем самым, облегчения решения представленных выше задач, уравнения представлялись в безразмерных переменных.

Введены следующие безразмерные переменные и параметры:

$$\Theta_1(\eta_1, Fo_1) = \left(\frac{A \cdot q_n - T_1(x_1, \tau)}{\alpha_n} \right) / T_1(R_1, 0) \quad - \quad \text{безразмерная температура}$$

наружного слоя пакета; $\eta_1 = x_1/R_1$ – безразмерная координата наружного слоя пакета; $Fo_1 = a_1 \cdot \tau/R_1^2$ – критерий Фурье наружного слоя пакета; $Bi_1 = \alpha_n \cdot R_1/\lambda_1$ – критерий Био наружного слоя пакета.

Уравнение (2.6) в безразмерных переменных приняло вид:

$$\frac{\partial \Theta_1(\eta_1, Fo_1)}{\partial Fo_1} = \frac{\partial^2 \Theta_1(\eta_1, Fo_1)}{\partial \eta_1^2}, \quad (Fo_1 > 0; 0 \leq \eta_1 \leq 1). \quad (2.10)$$

Граничные условия (2.7), (2.8) имеют следующий вид:

$$\frac{\partial \Theta_1(0, Fo_1)}{\partial \eta_1} = Bi_1 \cdot \Theta_1(0, Fo_1), \quad (2.11)$$

$$\Theta_1(1, Fo_1) = \Theta_{1,R}. \quad (2.12)$$

Начальные условия (2.9) следующего вида:

$$\Theta_1(\eta_1, 0) = \Theta_{1,0}(\eta_1). \quad (2.13)$$

После применения преобразования Лапласа относительно переменной Fo_1 к дифференциальному уравнению (2.10) получено дифференциальное уравнение для изображения:

$$\Theta_{1,L}''(\eta_1, s) - s \cdot \Theta_{1,L}(\eta_1, s) + \Theta_{1,0}(\eta_1) = 0. \quad (2.14)$$

Граничные условия (2.11), (2.12) для изображения имеют следующий вид:

$$\Theta_{1,L}'(0, s) = Bi_1 \cdot \Theta_{1,L}(0, s), \quad (2.15)$$

$$\Theta_{1,L}(1, s) = \frac{\Theta_{1,R}}{s}. \quad (2.16)$$

Решение дифференциального уравнения (2.14) в общем виде можно представить как [57, 83]:

$$\Theta_{1,L}(\eta_1, s) = A \cdot \operatorname{ch}(\sqrt{s} \cdot \eta_1) + B \cdot \operatorname{sh}(\sqrt{s} \cdot \eta_1) - \frac{1}{\sqrt{s}} \int_0^{\eta_1} \Theta_{1,0}(\xi) \cdot \operatorname{sh}[\sqrt{s} \cdot (\eta_1 - \xi)] d\xi, \quad (2.17)$$

где A, B – постоянные коэффициенты при заданных граничных условиях; ξ – безразмерная текущая координата.

Постоянный коэффициент B определен путем подстановки соотношения (2.17) в граничное условие (2.15):

$$\Theta'_{1,L}(0,s) = B \cdot \sqrt{s} = \text{Bi}_1 \cdot A,$$

откуда выражен коэффициент B :

$$B = \frac{\text{Bi}_1 \cdot A}{\sqrt{s}}. \quad (2.18)$$

Для определения постоянного коэффициента A соотношение (2.17) подставлено в граничное условие (2.16):

$$\Theta_{1,L}(1,s) = A \cdot \text{ch} \sqrt{s} + B \cdot \text{sh} \sqrt{s} - \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \int_0^1 \Theta_{1,0}(\xi) \cdot \text{sh}[\sqrt{s} \cdot (1 - \xi)] d\xi = \frac{\Theta_{1,R}}{s},$$

откуда с учетом выражения (2.18) определен коэффициент A :

$$A = \frac{\frac{\Theta_{1,R}}{\sqrt{s}} + \int_0^1 \Theta_{1,0}(\xi) \cdot \text{sh}[\sqrt{s} \cdot (1 - \xi)] d\xi}{\sqrt{s} \cdot \text{ch} \sqrt{s} + \text{Bi}_1 \cdot \text{sh} \sqrt{s}}.$$

Полученные коэффициенты A и B подставлены в выражение (2.17), произведена группировка и получено общее решение для изображения в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Theta_{1,L}(\eta_1, s) = & \frac{\Theta_{1,R} \left(\text{ch}(\sqrt{s} \cdot \eta_1) + \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \text{Bi}_1 \cdot \text{sh}(\sqrt{s} \cdot \eta_1) \right)}{\sqrt{s} \cdot (\sqrt{s} \cdot \text{ch} \sqrt{s} + \text{Bi}_1 \cdot \text{sh} \sqrt{s})} + \\ & + \frac{(\sqrt{s} \cdot \text{ch}(\sqrt{s} \cdot \eta_1) + \text{Bi}_1 \cdot \text{sh}(\sqrt{s} \cdot \eta_1))}{\sqrt{s} \cdot (\sqrt{s} \cdot \text{ch} \sqrt{s} + \text{Bi}_1 \cdot \text{sh} \sqrt{s})} \cdot \int_0^1 \Theta_{1,0}(\xi) \cdot \text{sh}[\sqrt{s} \cdot (1 - \xi)] d\xi - \\ & - \frac{(\sqrt{s} \cdot \text{ch} \sqrt{s} + \text{Bi}_1 \cdot \text{sh} \sqrt{s})}{\sqrt{s} \cdot (\sqrt{s} \cdot \text{ch} \sqrt{s} + \text{Bi}_1 \cdot \text{sh} \sqrt{s})} \int_0^{\eta_1} \Theta_{1,0}(\xi) \cdot \text{sh}[\sqrt{s} \cdot (\eta_1 - \xi)] d\xi. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Переход в область оригиналов осуществлен почленно, в соответствии со второй теоремой разложения [57, 83]. Для этой цели слагаемые решения (2.19) были обозначены как

$$\frac{\Phi_1(s)}{\Psi(s)} = \frac{\Theta_{1,R} \left(\text{ch}(\sqrt{s} \cdot \eta_1) + \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \text{Bi}_1 \cdot \text{sh}(\sqrt{s} \cdot \eta_1) \right)}{\sqrt{s} \cdot (\sqrt{s} \cdot \text{ch} \sqrt{s} + \text{Bi}_1 \cdot \text{sh} \sqrt{s})},$$

$$\frac{\Phi_2(s)}{\Psi(s)} = \frac{(\sqrt{s} \cdot \operatorname{ch}(\sqrt{s} \cdot \eta_1) + \operatorname{Bi}_1 \cdot \operatorname{sh}(\sqrt{s} \cdot \eta_1))}{\sqrt{s} \cdot (\sqrt{s} \cdot \operatorname{ch} \sqrt{s} + \operatorname{Bi}_1 \cdot \operatorname{sh} \sqrt{s})} \cdot \int_0^1 \Theta_{1,0}(\xi) \cdot \operatorname{sh}[\sqrt{s} \cdot (1 - \xi)] d\xi,$$

$$\frac{\Phi_3(s)}{\Psi(s)} = -\frac{(\sqrt{s} \cdot \operatorname{ch} \sqrt{s} + \operatorname{Bi}_1 \cdot \operatorname{sh} \sqrt{s})}{\sqrt{s} \cdot (\sqrt{s} \cdot \operatorname{ch} \sqrt{s} + \operatorname{Bi}_1 \cdot \operatorname{sh} \sqrt{s})} \cdot \int_0^{\eta_1} \Theta_{1,0}(\xi) \cdot \operatorname{sh}[\sqrt{s} \cdot (\eta_1 - \xi)] d\xi.$$

Числитель и знаменатель первого слагаемого в решении (2.19) являются обобщенными полиномами относительно s , а именно

$$\frac{\Phi_1(s)}{\Psi(s)} = \Theta_{1,R} \cdot \frac{\left(1 + \frac{1}{2!} \cdot s \cdot \eta_1^2 + \dots\right) + \operatorname{Bi}_1 \cdot \left(\eta_1 + \frac{1}{3!} \cdot s \cdot \eta_1^3 + \dots\right)}{s \cdot \left[\left(1 + \frac{1}{2!} \cdot s + \dots\right) + \operatorname{Bi}_1 \cdot \left(1 + \frac{1}{3!} \cdot s + \dots\right)\right]}.$$

Обобщенный полином $\Psi(s)$ не содержит постоянной, т. е. все условия теоремы разложения Ващенко-Захарченко соблюдены, поэтому ее можно применить при переходе решения для изображения к решению для оригинала [57, 83]:

$$L^{-1}\left[\frac{\Phi(s)}{\Psi(s)}\right] = \sum_{n=1}^n \frac{\Phi(s_n)}{\Psi'(s_n)} \cdot \exp(s_n \cdot \tau),$$

где s_n – корни функции $\Psi(s)$.

Для определения корней s_n функция $\Psi(s)$ была приравнена нулю и использованы соотношения $\operatorname{ch} z = \cos(i \cdot z)$, $\operatorname{sh} z = \frac{1}{i} \cdot \sin(i \cdot z)$:

$$\Psi(s) = \sqrt{s} \cdot \left(\sqrt{s} \cdot \cos(i \cdot \sqrt{s}) + \operatorname{Bi}_1 \cdot \frac{1}{i} \cdot \sin(i \cdot \sqrt{s})\right) = 0. \quad (2.20)$$

Получено: 1) нулевой корень $s = 0$; 2) бесчисленное множество корней s_n , определяемых из уравнения

$$\mu_n \cdot \cos \mu_n + \operatorname{Bi}_1 \cdot \sin \mu_n = 0,$$

где $i \cdot \sqrt{s_n} = \mu_n$ – корень характеристического уравнения.

После преобразования получено характеристическое уравнение следующего вида:

$$\mu_n = -\operatorname{Bi}_1 \cdot \operatorname{tg} \mu_n.$$

Далее было найдено $\Psi'(s)$ и подставлено вместо s соответствующее

ющее значение корня $s_n = -\mu_n^2$:

$$\psi'(s) = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{s}} \cdot [\sqrt{s} \cdot \operatorname{ch} \sqrt{s} + \operatorname{Bi}_1 \cdot \operatorname{sh} \sqrt{s}] + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{ch} \sqrt{s} + \frac{\sqrt{s}}{2} \cdot \operatorname{sh} \sqrt{s} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{Bi}_1 \cdot \operatorname{ch} \sqrt{s}.$$

при $s = s_n$ выражение в квадратных скобках равно нулю на основании выражения (2.20). Следовательно,

$$\lim_{s \rightarrow s_n} \psi' = \frac{1}{2} \cdot \cos \mu_n - \frac{1}{2} \cdot \mu_n \cdot \sin \mu_n + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{Bi}_1 \cdot \cos \mu_n = \frac{(\operatorname{Bi}_1 + \cos^2 \mu_n)}{2 \cdot \cos \mu_n}. \quad (2.21)$$

Кроме того:

$$\psi'(0) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{Bi}_1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \operatorname{Bi}_1 = 1 + \operatorname{Bi}_1. \quad (2.22)$$

Величины $\Phi_1(0)$ и $\Phi_1(s_n)$ равны:

$$\Phi_1(0) = \Theta_{1,R} \cdot (\operatorname{Bi}_1 \cdot \eta_1 + 1), \quad (2.23)$$

$$\Phi_1(s_n) = \frac{\Theta_{1,R}}{\mu_n} \cdot [\mu_n \cdot \cos(\mu_n \cdot \eta_1) + \operatorname{Bi}_1 \cdot \sin(\mu_n \cdot \eta_1)]. \quad (2.24)$$

Применяя обратное преобразование Лапласа к первому слагаемому выражения (2.19) с учетом решений (2.21 – 2.24), получаем:

$$L^{-1} \left[\frac{\Theta_{1,R} \cdot \left(\operatorname{ch}(\sqrt{s} \cdot \eta_1) + \frac{1}{\sqrt{s}} \cdot \operatorname{Bi}_1 \cdot \operatorname{sh}(\sqrt{s} \cdot \eta_1) \right)}{\sqrt{s} \cdot (\sqrt{s} \cdot \operatorname{ch} \sqrt{s} + \operatorname{Bi}_1 \cdot \operatorname{sh} \sqrt{s})} \right] = \quad (2.25)$$

$$= \Theta_{1,R} \cdot \frac{(\operatorname{Bi}_1 \cdot \eta_1 + 1)}{(\operatorname{Bi}_1 + 1)} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot \Theta_{1,R} \cdot (\operatorname{Bi}_1 \cdot \sin[\mu_n \cdot (\eta_1 - 1)])}{\mu_n \cdot (\operatorname{Bi}_1 + \cos^2 \mu_n)} \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot \operatorname{Fo}_1).$$

Далее рассматривались второе и третье слагаемые выражения (2.19). Числитель и знаменатель этих слагаемых являются обобщенными полиномами относительно s , и полином $\psi(s)$ не содержит постоянной, т. е. все условия теоремы разложения Ващенко-Захарченко соблюдены.

Так как $\psi'(0)$, $\psi'(s_n)$ одинаковы для всех трех слагаемых, то да-

лее были найдены только величины $\Phi_2(0)$, $\Phi_3(0)$ и $\Phi_2(s_n)$, $\Phi_3(s_n)$:

$$\Phi_2(0) = 0, \Phi_3(0) = 0, \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned} \Phi_2(s_n) = & -[\mu_n \cdot \cos(\mu_n \cdot \eta_1) + Bi_1 \cdot \sin(\mu_n \cdot \eta_1)] \times \\ & \times \int_0^1 \Theta_{1,0}(\xi) \cdot \sin[\mu_n \cdot (1 - \xi)] d\xi \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\Phi_3(s_n) = -[\mu_n \cdot \cos \mu_n + Bi_1 \cdot \sin \mu_n] \cdot \int_0^{\eta_1} \Theta_{1,0}(\xi) \cdot \sin[\mu_n \cdot (\eta_1 - \xi)] d\xi = 0. \quad (2.28)$$

Итак, решение в области оригиналов для второго слагаемого выражения (2.19) с учетом решений (2.26, 2.27) получено:

$$\begin{aligned} L^{-1} \left[\frac{(\sqrt{s} \cdot \operatorname{ch}(\sqrt{s} \cdot \eta) + Bi_1 \cdot \operatorname{sh}(\sqrt{s} \cdot \eta))}{\sqrt{s} \cdot (\sqrt{s} \cdot \operatorname{ch} \sqrt{s} + Bi_1 \cdot \operatorname{sh} \sqrt{s})} \cdot \int_0^1 \Theta_{1,0}(\xi) \cdot \operatorname{sh}[\sqrt{s} \cdot (1 - \xi)] d\xi \right] = \\ = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot (Bi_1 \cdot \sin[\mu_n \cdot (\eta_1 - 1)])}{(Bi_1 + \cos^2 \mu_n)} \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo_1) \int_0^1 \Theta_{1,0}(\xi) \cdot \sin[\mu_n \cdot (1 - \xi)] d\xi. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Третье слагаемое выражения (2.19) с учетом решений (2.26, 2.28) равно нулю.

Следовательно, решение дифференциального уравнения (2.10) с краевыми условиями (2.11–2.13) с учетом решений (2.25, 2.29) имеет следующий вид [123]:

$$\begin{aligned} \Theta_1(\eta_1, Fo_1) = \Theta_{1,R} \frac{(Bi_1 \cdot \eta_1 + 1)}{(Bi_1 + 1)} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot Bi_1 \cdot \sin[\mu_n \cdot (\eta_1 - 1)]}{(Bi_1 + \cos^2 \mu_n)} \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo_1) \times \\ \times \left(\int_0^1 \Theta_{1,0}(\xi) \cdot \sin[\mu_n \cdot (1 - \xi)] d\xi - \frac{\Theta_{1,R}}{\mu_n} \right), \end{aligned} \quad (2.30)$$

где μ_n – корень характеристического уравнения $\mu_n = -Bi_1 \cdot \operatorname{tg} \mu_n$.

Полученное аналитическое решение (2.30) можно использовать для расчета температурного поля однослойных материалов с граничными условиями третьего рода на левой границе, первого рода – на правой границе, неравномерными начальными условиями и постоянными теплофизическими свойствами материала.

Условие задачи для любого промежуточного ($i = 2, \dots, m-1$) слоя пакета материалов БОП можно сформулировать следующим образом: теплопередача в неограниченной пластине с граничными условиями

второго рода на левой границе и первого рода на правой границе слоя и неравномерными начальными условиями. Начало координат – на левой границе слоя (рис. 2.2 б).

Математически задача теплопроводности для промежуточного слоя может быть записана следующим образом:

$$\frac{\partial T_i(x_i, \tau)}{\partial \tau} = a_i \cdot \frac{\partial^2 T_i(x_i, \tau)}{\partial x_i^2}, \quad (\tau > 0; 0 \leq x_i \leq R_i). \quad (2.31)$$

Граничные условия:

$$-\lambda_i \cdot \frac{\partial T_i(0, \tau)}{\partial x_i} = q_{i-1}, \quad (2.32)$$

$$T_i(R_i, \tau) = T_i(R_i, 0) = T_{i,R}. \quad (2.33)$$

Начальные условия:

$$T_i(x_i, 0) = T_{i,0}(x_i). \quad (2.34)$$

Для сокращения числа переменных величин введены безразмерные переменные и параметры: $\Theta_i(\eta_i, Fo_i) = (T_i(x_i, \tau) - T_i(R_i, 0)) / T_i(R_i, 0)$ – безразмерная температура i -го слоя пакета; $\eta_i = x_i / R_i$ – безразмерная координата i -го слоя пакета; $Fo_i = a_i \cdot \tau / R_i^2$ – критерий Фурье i -го слоя пакета; $Ki_i = (q_{i-1} \cdot R_i) / (\lambda_i \cdot T(R_i, 0))$ – критерий Кирпичева i -го слоя пакета.

Уравнение (2.31) в безразмерных переменных приняло вид:

$$\frac{\partial \Theta_i(\eta_i, Fo_i)}{\partial Fo_i} = \frac{\partial^2 \Theta_i(\eta_i, Fo_i)}{\partial \eta_i^2}, \quad (Fo_i > 0; 0 \leq \eta_i \leq 1) \quad (2.35)$$

Граничные условия (2.32), (2.33) имеют следующий вид:

$$-\frac{\partial \Theta_i(0, Fo_i)}{\partial \eta_i} = Ki_i, \quad (2.36)$$

$$\Theta_i(1, Fo_i) = 0. \quad (2.37)$$

Начальные условия (2.34) следующего вида:

$$\Theta_i(\eta_i, 0) = \Theta_{i,0}(\eta_i). \quad (2.38)$$

Аналитическое решение дифференциального уравнения (2.35) с краевыми условиями (2.36–2.38) получено методом интегрального преобразования Лапласа по аналогии с предыдущей задачей теплопередачи для наружного слоя пакета в условиях нестационарной теплопроводности и имеет следующий вид [123]:

$$\Theta_i(\eta_i, Fo_i) = Ki_i \cdot \left[(1 - \eta_i) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot \cos(\mu_n \cdot \eta_i)}{\mu_n^2} \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo_i) \right] + \sum_{n=1}^{\infty} 2 \cdot \cos(\mu_n \cdot \eta_i) \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo_i) \cdot \int_0^1 \Theta_{i,0}(\xi) \cdot \cos(\mu_n \cdot \xi) d\xi, \quad (2.39)$$

где μ_n – корень характеристического уравнения $\mu_n = (2 \cdot n - 1) \cdot \frac{\pi}{2}$.

Полученное аналитическое решения (2.39) можно использовать для расчета температурного поля однослойных материалов с граничными условиями второго рода на левой границе, первого рода – на правой границе, неравномерными начальными условиями и постоянными теплофизическими свойствами материала.

Условие задачи для внутреннего ($i = m$) слоя пакета материалов БОП можно сформулировать следующим образом: теплопередача в неограниченной пластине с граничными условиями второго рода на левой границе и третьего рода на правой границе слоя и неравномерными начальными условиями. Начало координат – на левой границе слоя (рис. 2.2 в).

Математически задачу теплопроводности для внутреннего слоя можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial T_m(x_m, \tau)}{\partial \tau} = a_m \cdot \frac{\partial^2 T_m(x_m, \tau)}{\partial x_m^2}, \quad (\tau > 0; 0 \leq x_m \leq R_m). \quad (2.40)$$

Граничные условия:

$$-\lambda_m \cdot \frac{\partial T_m(0, \tau)}{\partial x_m} = q_{m-1}, \quad (2.41)$$

$$-\lambda_m \cdot \frac{\partial T_m(R_m, \tau)}{\partial x_m} = \alpha_b \cdot (T_m(R_m, \tau) - T_c). \quad (2.42)$$

Начальные условия:

$$T_m(x_m, 0) = T_{m,0}(x_m). \quad (2.43)$$

Для сокращения числа переменных величин введены безразмерные переменные и параметры: $\Theta_m(\eta_m, Fo_m) = (T_m(x_m, \tau) - T_c)/T_c$ – безразмерная температура m -го слоя пакета; $\eta_m = x_m/R_m$ – безразмерная координата m -го слоя пакета; $Fo_m = a_m \cdot \tau/R_m^2$ – критерий Фурье m -го слоя пакета; $Ki_m = (q_{m-1} \cdot R_m)/(\lambda_m \cdot T_c)$ – критерий Кирпичева m -го слоя пакета; $Bi_m = \alpha_b \cdot R_m/\lambda_m$ – критерий Био m -го слоя пакета.

Уравнение (2.40) в безразмерных переменных приняло вид:

$$\frac{\partial \Theta_m(\eta_m, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 \Theta_m(\eta_m, Fo_m)}{\partial \eta_m^2}, \quad (Fo_m > 0; 0 \leq \eta_m \leq 1). \quad (2.44)$$

Граничные условия (2.41), (2.42) имеют следующий вид:

$$\frac{\partial \Theta_m(0, Fo_m)}{\partial \eta_m} = Ki_m, \quad (2.45)$$

$$-\frac{\partial \Theta_m(1, Fo_m)}{\partial \eta_m} = Bi_m \cdot \Theta_m(1, Fo_m). \quad (2.46)$$

Начальные условия (2.43) следующего вида:

$$\Theta_m(\eta_m, 0) = \Theta_{m,0}(\eta_m). \quad (2.47)$$

Аналитическое решение дифференциального уравнения (2.44) с крайевыми условиями (2.45–2.47) получено методом интегрального преобразования Лапласа по аналогии с задачей теплопередачи для наружного слоя пакета в условиях нестационарной теплопроводности и имеет следующий вид [123]:

$$\begin{aligned} \Theta_m(\eta_m, Fo_m) = & \\ = Ki_m \cdot & \left[\frac{[Bi_m \cdot (1 - \eta_m) + 1]}{Bi_m} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot Bi_m \cdot \cos(\mu_n \cdot \eta_m)}{\mu_n^2 \cdot (Bi_m + \sin^2 \mu_n)} \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo_m) \right] + \quad (2.48) \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot Bi_m \cdot \cos(\mu_n \cdot \eta_m)}{(Bi_m + \sin^2 \mu_n)} \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo_m) \cdot \int_0^1 \Theta_{m,0}(\xi) \cdot \cos(\mu_n \cdot \xi) d\xi, \end{aligned}$$

где μ_n – корень характеристического уравнения $\mu_n = Bi_m \cdot \text{ctg} \mu_n$.

Полученное аналитическое решение (2.48) можно использовать для расчета температурного поля однослойных материалов с второго рода на левой границе, третьего рода – на правой границе, неравномерными начальными условиями и постоянными теплофизическими свойствами материала.

2.2.3 Алгоритм расчета распределения температуры в многослойном пакете материалов при испытаниях на устойчивость к тепловому воздействию с учетом зависимости показателей теплофизических свойств материалов пакета от температуры

Полученные аналитические решения (2.30, 2.39, 2.48) можно использовать для расчета температурного поля однослойных материалов с различными несимметричными граничными условиями.

Для расчета распределения температуры в многослойном пакете были определены величины температурных градиентов на правой границе для каждого слоя пакета.

Учитывая, что

$$\frac{\partial T_1(x_1, \tau)}{\partial x_1} = -\frac{T_1(R_1, 0)}{R_1} \cdot \frac{\partial \Theta_1(\eta_1, Fo_1)}{\partial \eta_1},$$

то температурный градиент на внутренней поверхности первого слоя m -слойного пакета равен:

$$\frac{\partial T_1(R_1, \tau)}{\partial x_1} = -\frac{T_1(R_1, 0)}{R_1} \cdot \left[\frac{\Theta_{1,R} \cdot Bi_1}{(Bi_1 + 1)} - 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{Bi_1 \cdot \mu_n}{(Bi_1 + \cos^2 \mu_n)} \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo_1) \times \right. \\ \left. \times \left(\int_0^1 \Theta_{1,0}(\xi) \cdot \sin[\mu_n \cdot (1 - \xi)] d\xi - \frac{\Theta_{1,R}}{\mu_n} \right) \right]. \quad (2.49)$$

Так как

$$\frac{\partial T_i(x_i, \tau)}{\partial x_i} = \frac{T_i(R_i, 0)}{R_i} \cdot \frac{\partial \Theta_i(\eta_i, Fo_i)}{\partial \eta_i},$$

то температурный градиент на внутренней поверхности i -го слоя m -слойного пакета равен:

$$\frac{\partial T_i(R_i, \tau)}{\partial x_i} = \frac{T_i(R_i, 0)}{R_i} \cdot \left[\begin{aligned} & \left(-Ki_i + Ki_i \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot \sin \mu_n}{\mu_n} \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo_i) \right) - \\ & - \sum_{n=1}^{\infty} 2 \cdot \mu_n \cdot \sin \mu_n \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo_i) \times \\ & \times \int_0^1 \Theta_{i,0}(\xi) \cdot \cos(\mu_n \cdot \xi) d\xi \end{aligned} \right]. \quad (2.50)$$

Температурный градиент на внутренней поверхности m -го слоя пакета, с учетом что

$$\frac{\partial T_m(x_m, \tau)}{\partial x_m} = \frac{T_c}{R_m} \cdot \frac{\partial \Theta_m(\eta_m, Fo_m)}{\partial \eta_m},$$

равен:

$$\frac{T_m(R_m, \tau)}{\partial x_m} = \frac{T_c}{R_m} \times \left[\begin{aligned} & -Ki_m + 2 \cdot Ki_m \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{Bi_m \cdot \sin \mu_n}{\mu_n \cdot (Bi_m + \sin^2 \mu_n)} \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo_m) - \\ & - 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{Bi_m \cdot \mu_n \cdot \sin \mu_n}{(Bi_m + \sin^2 \mu_n)} \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo_m) \times \int_0^1 \Theta_{m,0}(\xi) \cdot \cos(\mu_n \cdot \xi) d\xi \end{aligned} \right]. \quad (2.51)$$

Общее решение для расчета распределения температуры в многослойном пакете материалов БОП при нормативных испытаниях на устойчивость к тепловому воздействию реализовано с помощью методики численного сопряжения на каждом малом временном интервале аналитических решений (2.30, 2.39, 2.48).

Алгоритм расчета температурных полей в трехслойном пакете с помощью аналитических решений (2.30, 2.39, 2.48) и их сопряжений на каждом временном интервале состоит из следующей последовательности шагов:

1. В начальный момент времени температура всего пакета равна T_0 (рис. 2.3 а). Для первого малого интервала времени рассчитывается поле температуры в первом слое на основании выражения (2.30) (рис. 2.3 б).

2. Определяется величина температурного градиента на границе слоев 1 и 2, используя выражение (2.49). Его величина принимает участие в определении граничного условия второго рода в задаче теп-

лопередачи для второго слоя, а именно для определения критерия Кирпичева (Ki_2):

$$q_1 = -\lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1(R_1, \tau)}{\partial x_1}, \quad Ki_2 = (q_1 \cdot R_2) / (\lambda_2 \cdot T_2(R_2, 0)).$$

3. На основании выражения (2.39) рассчитывается поле температур во втором слое (рис. 2.3 в).

4. Используя выражение (2.50), рассчитывают величину температурного градиента на границе слоев 2 и 3, она принимает участие в определении граничного условия второго рода в задаче теплопередачи для третьего слоя, а именно для определения критерия Кирпичева (Ki_3):

$$q_2 = -\lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2(R_2, \tau)}{\partial x_2}, \quad Ki_3 = (q_2 \cdot R_3) / (\lambda_3 \cdot T_3(R_3, 0)).$$

5. На основании выражения (2.48) рассчитывают поле температур в третьем слое (рис. 2.3 з).

6. Новое значение температуры третьего слоя на границе слоев 2 и 3 задается в качестве граничного условия первого рода ($T_2(R_2, 0)$) в задаче теплопередачи для второго слоя. С новым значением граничного условия первого рода на основании выражения (2.39) пересчитывается поле температур во втором слое для текущего интервала времени (рис. 2.3 д).

7. Новое значение температуры второго слоя на границе слоев 1 и 2 задается в качестве граничного условия первого рода ($T_1(R_1, 0)$) в задаче теплопередачи для первого слоя. С новым значением граничного условия первого рода на основании выражения (2.30) пересчитывается поле температур в первом слое для текущего интервала времени (рис. 2.3 е).

8. Далее процесс начинается с расчета поля температуры в первом слое пакета, но уже для очередного временного интервала.

Алгоритм расчета для следующих временных интервалов новым изменениям не подвергается. Расчет продолжается до тех пор, пока не истечет время процесса теплового воздействия на пакет.

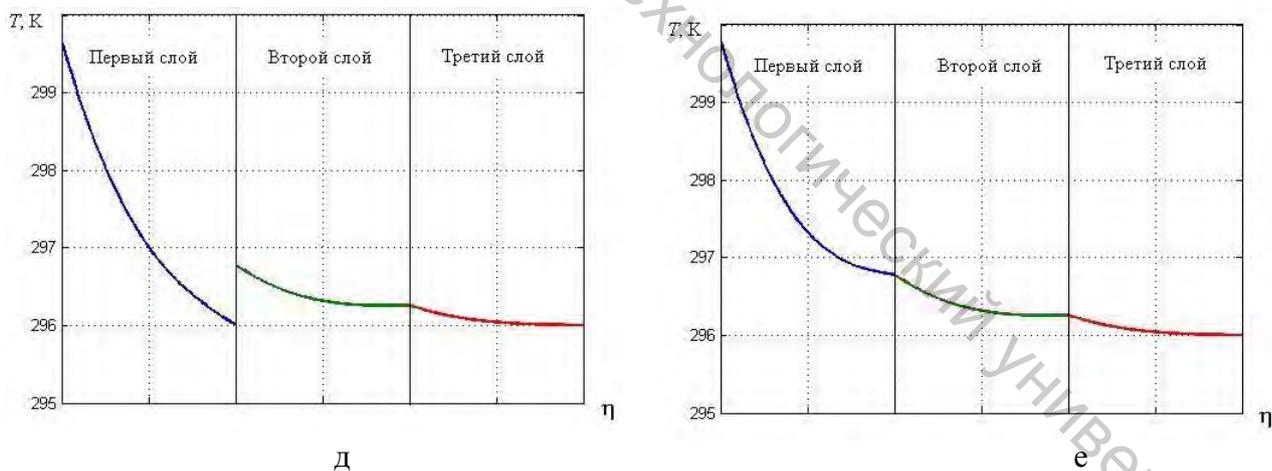
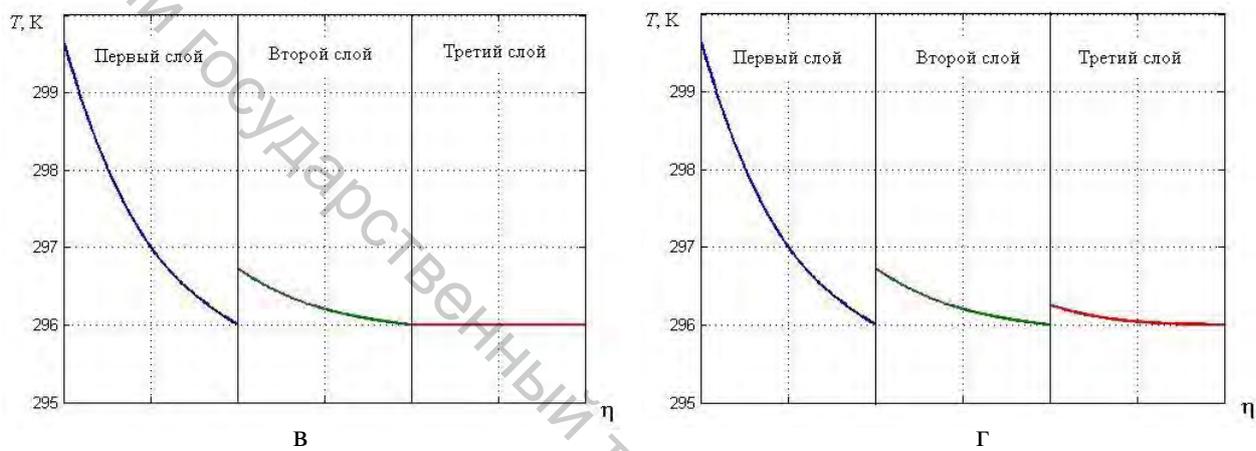
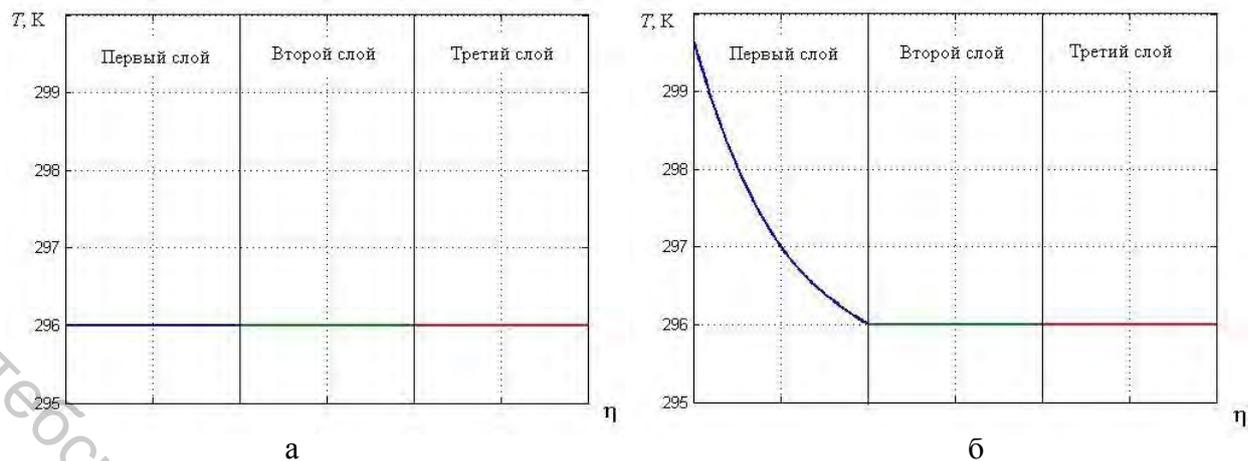


Рисунок 2.3 – Алгоритм расчета температурных полей в трехслойном пакете с помощью аналитических решений (2.30, 2.39, 2.48) и их сопряжений

Блок-схема расчета температурных полей в трехслойном пакете материалов боевой одежды пожарных приведена в приложении А.

Приведенный алгоритм расчета температурных полей в пакете материалов боевой одежды пожарных в условиях нестационарной теплопроводности представлен для трехслойного пакета. Однако не составляет особого труда распространить этот алгоритм на m -слойный пакет. Тогда для расчета температурных полей внешних ($i = 1$ и $i = m$) слоев пакета будут использоваться аналитические решения (2.30, 2.48), а для каждого промежуточного ($i = 2, \dots, m-1$) слоя пакета – (2.39). С увеличением слоев пакета усложнится блок-схема расчета процесса теплопередачи: между блоком, описывающим второй слой и блоком, описывающим внутренний ($i = m$) слой пакета, вставляется необходимое $(n-3)$ количество блоков аналогичных по своей структуре блоку второго слоя трехслойного пакета.

Алгоритм расчета температурных полей в многослойном пакете материалов БОП реализован в среде MATLAB. Интерфейс разработанного продукта представлен на рисунке 2.4.

Программный продукт позволяет в течение небольшого интервала времени получить распределение температуры по слоям пакета материалов БОП в процессе практически любого теплового воздействия и провести всесторонний анализ процесса теплопередачи (рис. 2.5).

Адекватность получаемых результатов расчета температурного поля зависит от величины шага по времени и по толщине слоя, а также от достоверности оценки показателей теплофизических свойств всех слоев пакета.

2.2.4 Определение рациональных режимов моделирования процесса теплопереноса в многослойном пакете материалов боевой одежды пожарных

Для зонального метода расчета распределения температуры в многослойном пакете, который сочетает в себе как аналитические, так и численные методы, было отмечено, что на адекватность получаемых результатов существенное влияние оказывает не только степень точности определения теплофизических показателей материалов пакета, но и факторы, характеризующие условия численного сопряжения полученных аналитических решений. К таким факторам следует отнести: шаг по времени Δt ; шаг по толщине слоя $\Delta \eta_i = \Delta x_i / R_i$ ($i = 1, \dots, m$).

Согласно выбранной методике сопряжения аналитических решений (2.30, 2.39, 2.48) следует, что величины шагов по времени и по толщине слоя необходимо выбирать минимально возможными, но нужно отметить, что с уменьшением шага заметно увеличивается вычислительное время.

Ввод исходных данных

Количество слоёв пакета: 3 4 5

Кoeffициент теплоотдачи на наружной поверхности пакета: 4.38 Вт/К*м²

Кoeffициент теплоотдачи на внутренней поверхности пакета: 22.72 Вт/К*м²

Степень черноты материала верха: 0.71

Плотность потока теплового воздействия: 4000 Вт/м²

Начальная температура: 20 °C

Время теплового воздействия: 1000 с

Ввод исходных данных

Геометрические свойства

1-й слой	2-й слой	3-й слой	4-й слой	5-й слой
Толщина, м	0.0017	0.0009	0.0044	0.0002
Объемная плотность, кг/м ³	448	753	306	816

Кoeffициент теплопроводности, Вт/м*К

1-й слой	2-й слой	3-й слой	4-й слой	5-й слой
Температура 25 °C	0.104	0.126	0.082	0.059
50 °C	0.103	0.131	0.087	0.060
75 °C	0.106	0.134	0.091	0.060
100 °C	0.111	0.146	0.093	0.064
125 °C	0.121	0.152	0.107	0.067
150 °C	0.125	0.154	0.109	0.068

Кoeffициент удельной теплоёмкости, Дж/К*кг

1-й слой	2-й слой	3-й слой	4-й слой	5-й слой
Температура 25 °C	1126	655	1243	649
50 °C	1275	1135	1238	983
75 °C	1290	1273	1397	1286
100 °C	1275	1277	1468	1394
125 °C	1328	1203	1630	1474
150 °C	1585	1334	1755	1345

Расчёт

Сброс данных

Рисунок 2.4 – Окно программного продукта для расчета распределения температуры в многослойном пакете материалов в режиме ввода исходных данных

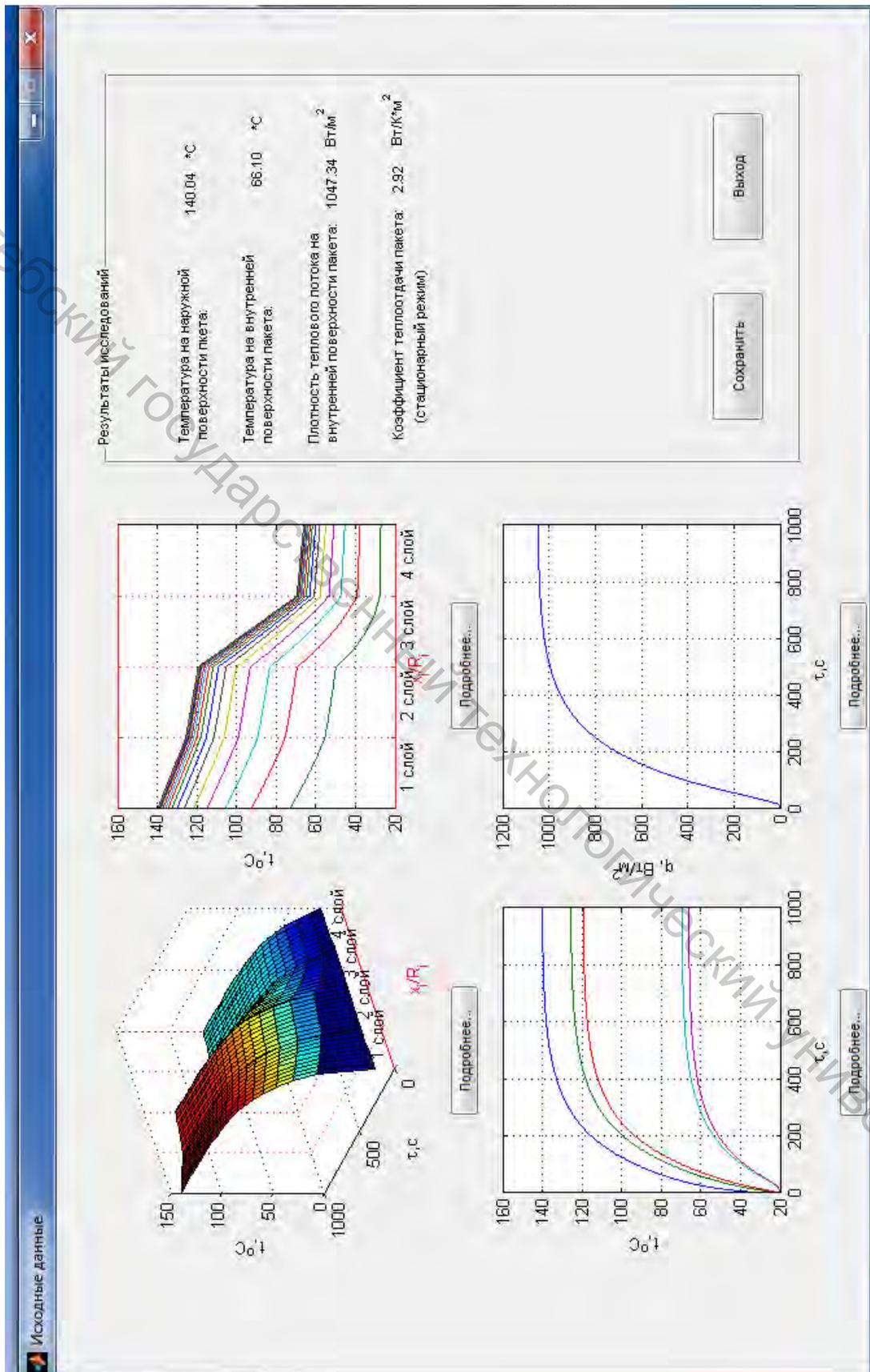


Рисунок 2.5 – Окно программного продукта для расчета распределения температуры в многослойном пакете материалов в режиме вывода результатов

Так же необходимо учитывать, что аналитические решения (2.30, 2.39, 2.48) представлены в виде бесконечных сходящихся рядов. С увеличением времени, точнее числа Фурье, ряд быстро сходится и при некотором значении Fo становится ничтожно малым по сравнению с двумя первыми членами решения, так что всем рядом можно пренебречь [57]. С уменьшением числа Фурье число членов ряда, которое надо учитывать для обеспечения заданной точности расчетов, резко возрастает, однако использование современных компьютеров позволяет справиться с этой проблемой.

С учетом известных теплофизических коэффициентов для моделей (2.30, 2.39, 2.48) проведены исследования влияния условий сопряжения, а также количества членов сходящегося ряда аналитических решений на результаты расчета температурного поля в многослойном пакете материалов. Исследования производились для теплового воздействия в диапазоне от 1000 до 5000 Вт/м² до наступления стационарного режима в пакете. Величины шагов по времени и по толщине слоя, а также число членов сходящегося ряда аналитических решений были выбраны исходя из обычного положения, что дальнейшее уменьшение $\Delta\tau$, $\Delta\eta_i$ и увеличение n не приводит к заметному изменению температур. Численные значения $\Delta\tau$ и $\Delta\eta_i$ последовательно уменьшались, а n увеличивалось до таких пределов, пока расхождение в конечных результатах не удовлетворило необходимой точности для практических расчетов. За начальные величины исследуемых факторов были выбраны: $\Delta\tau = 1$ с, $\Delta\eta_i = 0,05$ ($i = 1, \dots, 4$), $n = 6$.

Исследования влияния $\Delta\eta_i$ на результаты расчета температурного поля в многослойном пакете материалов проводились при начальных значениях $\Delta\tau$ и n . Некоторые результаты расчета представлены на рисунках 2.6, 2.7.

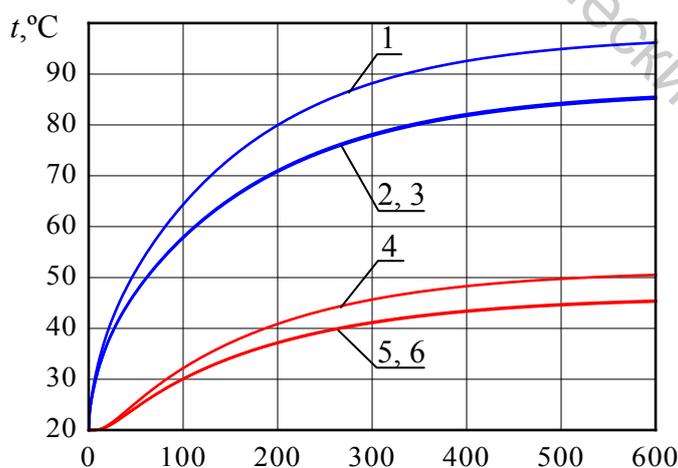


Рисунок 2.6 – Зависимости температуры на наружной (1, 2, 3) и внутренней (4, 5, 6) поверхностях пакета материалов от времени при плотности теплового воздействия $q_n = 2000$ Вт/м²:

1, 4 – $\Delta\eta_i = 0,05$; 2, 5 – $\Delta\eta_i = 0,01$; 3, 6 – $\Delta\eta_i = 0,005$; 1, 2, 3, 4, 5, 6 – $\Delta\tau = 1$ с, $n = 6$

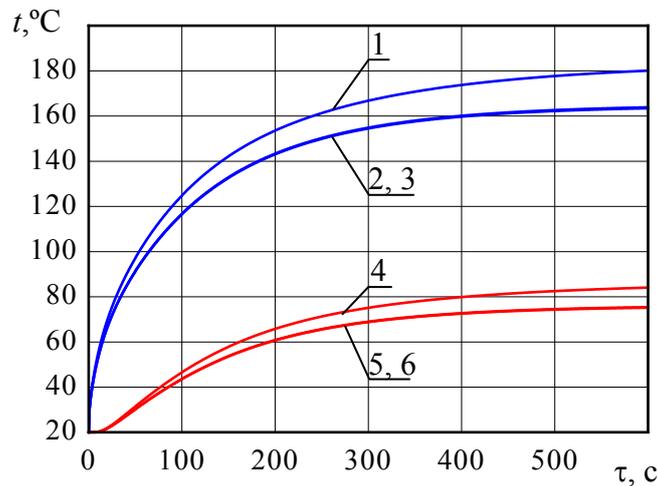


Рисунок 2.7 – Зависимости температуры на наружной (1, 2, 3) и внутренней (4, 5, 6) поверхностях пакета материалов от времени при плотности теплового воздействия $q_{\text{п}} = 5000 \text{ Вт/м}^2$:

1, 4 – $\Delta\eta_i = 0,05$; 2, 5 – $\Delta\eta_i = 0,01$; 3, 6 – $\Delta\eta_i = 0,005$; 1, 2, 3, 4, 5, 6 – $\Delta\tau = 1 \text{ с}$, $n = 6$

По результатам проведенных исследований было установлено, что:

- при $\Delta\eta_i = 0,05$ и $\Delta\eta_i = 0,01$ наблюдается значительное расхождение температуры для всех материалов пакета в исследованном диапазоне теплового воздействия. Например, максимальное расхождение температуры на наружной поверхности и внутренней поверхности пакета при $q_{\text{п}} = 5000 \text{ Вт/м}^2$ составляет более $16 \text{ }^\circ\text{C}$ и $8 \text{ }^\circ\text{C}$, соответственно;

- при $\Delta\eta_i = 0,01$ и $\Delta\eta_i = 0,005$ в многослойном пакете материалов наблюдается расхождение температуры только в первом знаке после запятой.

На основании вышеизложенного в качестве рационального шага по толщине слоя был выбран $\Delta\eta_i = 0,01$.

Исследования влияния $\Delta\tau$ на результаты расчета температурного поля в многослойном пакете материалов проводились при начальном значении n и рациональном значении $\Delta\eta_i = 0,01$. Некоторые результаты расчета представлены на рисунках 2.8, 2.9.

Анализ результатов проведенных исследований позволяет отметить, что:

- при $\Delta\tau = 1 \text{ с}$ и $\Delta\tau = 0,5 \text{ с}$ наблюдается значимое расхождение температуры для всех материалов пакета в исследованном диапазоне теплового воздействия. Например, максимальное расхождение температуры на наружной поверхности и внутренней поверхности пакета при $q_{\text{п}} = 5000 \text{ Вт/м}^2$ составляет более $4 \text{ }^\circ\text{C}$ и $2 \text{ }^\circ\text{C}$, соответственно;

- при $\Delta\tau = 0,5 \text{ с}$ и $\Delta\tau = 0,25 \text{ с}$ в многослойном пакете материалов наблюдается незначительное расхождение температуры. Например, максимальное расхождение температуры на наружной поверхности и внутренней поверхности пакета при $q_{\text{п}} = 5000 \text{ Вт/м}^2$ составляет не более $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ и $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$, соответственно.

На основании вышеизложенного в качестве рационального шага по времени был выбран $\Delta\tau = 0,5$ с.

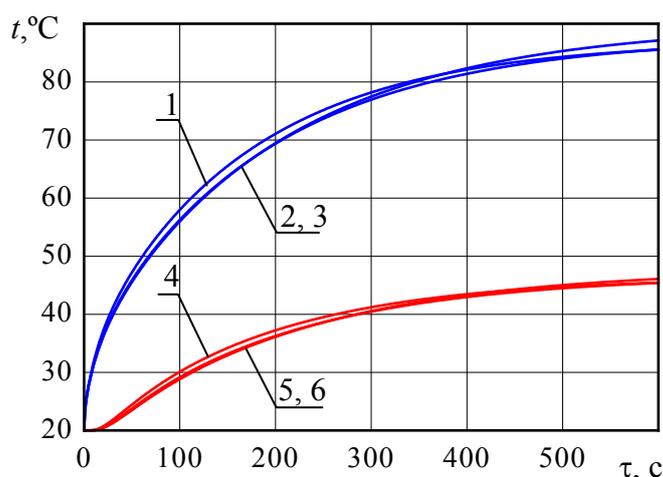


Рисунок 2.8 – Зависимости температуры на наружной (1, 2, 3) и внутренней (4, 5, 6) поверхностях пакета материалов от времени при плотности теплового воздействия $q_n = 2000 \text{ Вт/м}^2$:

1, 4 – $\Delta\tau = 1$ с; 2, 5 – $\Delta\tau = 0,5$ с; 3, 6 – $\Delta\tau = 0,25$ с; 1, 2, 3, 4, 5, 6 – $\Delta\eta_i = 0,01$, $n = 6$

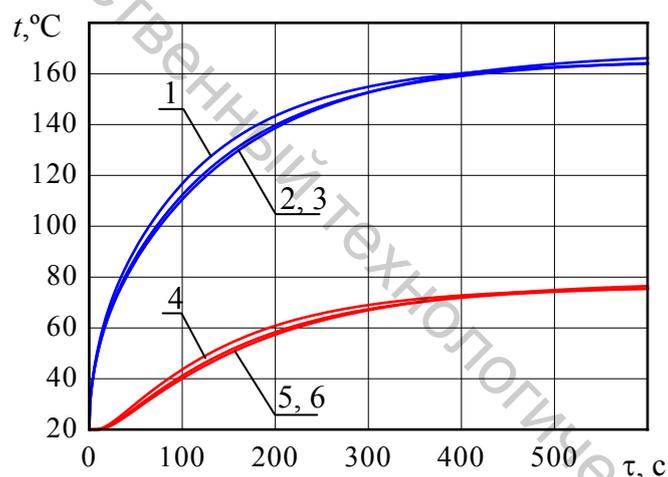


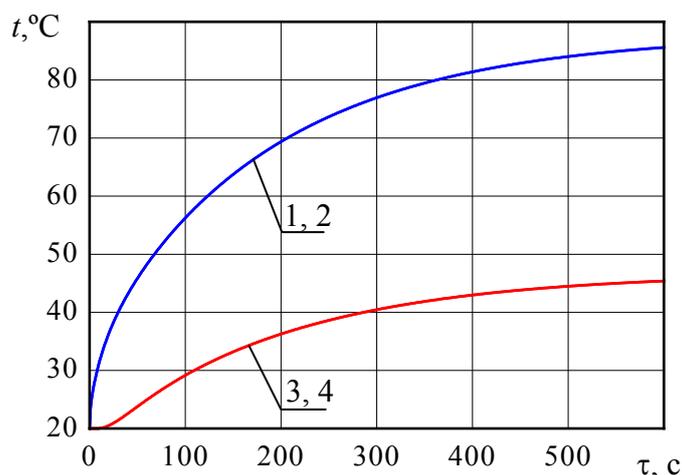
Рисунок 2.9 – Зависимости температуры на наружной (1, 2, 3) и внутренней (4, 5, 6) поверхностях пакета материалов от времени при плотности теплового воздействия $q_n = 5000 \text{ Вт/м}^2$:

1, 4 – $\Delta\tau = 1$ с; 2, 5 – $\Delta\tau = 0,5$ с; 3, 6 – $\Delta\tau = 0,25$ с; 1, 2, 3, 4, 5, 6 – $\Delta\eta_i = 0,01$, $n = 6$

Расчет температурного поля в многослойном пакете при разном количестве членов сходящегося ряда аналитических решений и рациональных значениях $\Delta\tau$, $\Delta\eta_i$ показал, что:

- в исследованном диапазоне теплового воздействия наибольшие расхождения температуры наблюдаются на внутренней поверхности слоя с наименьшим критерием Фурье;

- расхождение температуры для всех материалов пакета при $n = 6$ и $n = 10$ наблюдается только в третьем знаке после запятой (рис. 2.10, 2.11).



1 – $n = 6$; 2 – $n = 10$; 1, 2 – $\Delta\tau = 0,5$ с, $\Delta\eta_i = 0,01$

Рисунок 2.10 – Зависимости температуры на наружной (1, 2) и внутренней (3, 4) поверхностях пакета материалов от времени при плотности теплового воздействия $q_{\text{п}} = 2000$ Вт/м²: 1, 3 – $n = 6$; 2, 4 – $n = 10$; 1, 2, 3, 4 – $\Delta\tau = 0,5$ с, $\Delta\eta_i = 0,01$

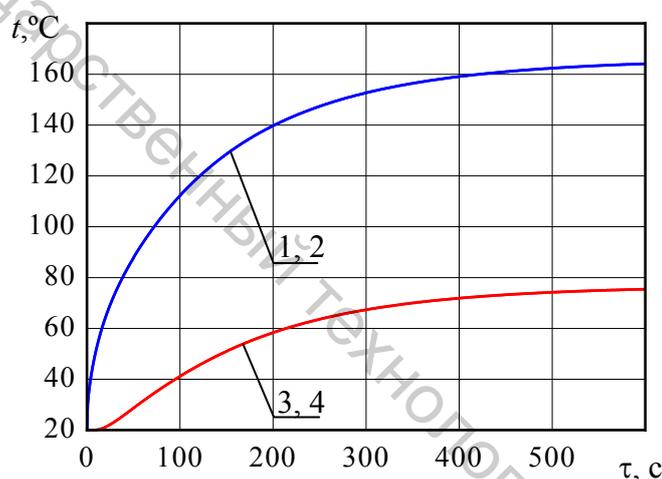


Рисунок 2.11 – Зависимости температуры на наружной (1, 2) и внутренней (3, 4) поверхностях пакета материалов от времени при плотности теплового воздействия $q_{\text{п}} = 5000$ Вт/м²: 1, 3 – $n = 6$; 2, 4 – $n = 10$; 1, 2, 3, 4 – $\Delta\tau = 0,5$ с, $\Delta\eta_i = 0,01$

Поэтому в качестве рационального числа членов сходящегося ряда аналитических решений был выбран $n = 6$, что соответствует данным, представленным в работах академика А. В. Лыкова [57].

Таким образом, в результате проведенных исследований, основанных на имитационном моделировании процесса теплопереноса в пакете материалов, установлено, что рациональными параметрами для численного сопряжения аналитических решений (2.30, 2.55, 2.81) являются [123]: $\Delta\tau = 0,5$ с; $\Delta\eta_i = 0,01$; $n = 6$.

Уменьшение численного значения $\Delta\tau$, $\Delta\eta_i$ или увеличение числа n не является экономически обоснованным, так как приводит к существенному увеличению машинного времени расчета температурного поля в многослойном пакете материалов.

2.3 Исследование процессов теплопереноса в многослойном пакете материалов для боевой одежды пожарных при несимметричных граничных условиях

Для оценки адекватности полученных моделей теплопереноса в многослойных пакетах материалов результатам эксперимента на базе научно-исследовательского центра Витебского областного управления МЧС проведен ряд экспериментальных исследований.

В качестве объекта исследования использовался пакет материалов, применяемый при изготовлении БОП в Республике Беларусь и состоящий из *материала верха* – огнезащитная ткань «ЛЕОНИД» (метаарамид – 93 %, параарамид – 5 %, антистатик – 2 %) комбинированного переплетения рип-стоп, в основе и утке которой использовались крученые нити линейной плотности 20 текс × 2 из метаарамидных и параарамидных волокон, ткань с поверхностной плотностью 240 г/м², плотностью по основе 338 нитей на 10 см, а по утку – 246 нитей на 10 см; *водонепроницаемого слоя* – ткань водупорная «СИСУ» (хлопок 23 %, полиэфир 77 %) полотняного переплетения с полиуретановым покрытием поверхностной плотности 169 г/м²; *теплоизоляционной подстежки* – нетканое холстопршивное полотно (полиэфир – 50 %, арселон – 50 %) с поверхностной плотностью 300 г/м²; *подкладочной ткани* – полиэфирная ткань полотняного переплетения с поверхностной плотностью 80 г/м².

Для исследований было отобрано пять проб пакета материалов размером 210×70 мм. Перед испытаниями пробы материалов были выдержаны в климатических условиях по ГОСТ 10681 и тщательно визуально осмотрены для выявления видимых дефектов, комплектности, состояния поверхностей. При проведении экспериментальных исследований применялось испытательное оборудование и средства измерений, приведенные таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Испытательное оборудование и средства измерений, применяемые при проведении экспериментальных исследований

Наименование испытательного оборудования, средств измерений	Дата прохождения метрологической аттестации, поверки, калибровки
Установка для определения устойчивости к воздействию теплового потока	свидет. № 136 до 01.07.2016.
Измеритель-регулятор «Сосна-002», зав. № 11768	клеймо до октября 2015 г.
Приемник теплового потока ТП-2003 № 355	свидет. № 20 до 19.06.2016.
Вольтметр В7-72	свидет. № 7480-42 до 04.06.2016.
Термоэлектрический преобразователь ТХА № 4295, 4301, 4298, 4300, 6833, 6834	свидет. № 6-4913, 6-4914 до 05.08.2016.
Линейка ГОСТ 427-75	клеймо до апреля 2016 г.

Испытания проводились при воздействии теплового потока в диапазоне от 1000 до 5000 Вт/м², действие которых гарантированно не приводит к возникновению видимых признаков деструкции пакета: разрушения наружной поверхности материала верха и внутренних слоев пакета (оплавления, обугливания, прогара); отслоения полимерного покрытия от тканевой основы водонепроницаемого слоя; воспламенения. Продолжительность теплового воздействия – до наступления стационарного режима.

Методика проведения экспериментальных исследований процессов теплопереноса в многослойном пакете материалов боевой одежды пожарных соответствует нормативным испытаниям на устойчивость к воздействию теплового потока пакета материалов [5] с некоторыми дополнениями и состоит из следующей последовательности шагов:

1. Подключают радиационную панель и систему охлаждения установки по определению устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов, а также регистрирующие приборы к источникам, соответственно, электропитания и водоснабжения.

2. Радиационную панель прогревают в течение (25 ± 5) мин от начала подключения к источнику электропитания.

3. Поднимают защитную заслонку радиационной панели, открывая доступ теплового потока к датчику для измерения плотности теплового потока.

4. Изменяя расстояние между радиационной панелью и датчиком для измерения теплового потока, устанавливают держатель образца на таком расстоянии, при котором значение плотности теплового потока, попадающего на образец, равно требуемому значению.

5. Опускают заслонку и фиксируют расстояние от радиационной панели до держателя образца.

6. Устанавливают пакет материалов на держателе с помощью зажимов и устройства натяжения.

7. Поднимают защитную заслонку радиационной панели и выдерживают пакет под действием теплового потока установленной плотности до наступления в нем стационарного теплового режима.

8. Регистрируют плотность теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов, а также температуру на наружной и внутренней поверхности каждого слоя пакета.

9. После наступления установившегося теплового режима в пакете материалов защитную заслонку радиационной панели опускают. Пакет материалов изымается из держателя. Далее для другого значения плотности теплового потока повторяются шаги 3–8.

На основании полученных результатов исследования строятся зависимости изменения плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета, а так же температуры на наружной и внутренней поверхности каждого слоя пакета от времени теплового воздействия.

2.3.1 Оценка параметров математических моделей процесса теплопереноса в многослойном пакете материалов боевой одежды пожарных

Для практического использования разработанного метода расчета распределения температуры по толщине многослойного пакета материалов при тепловом воздействии необходимы:

– показатели теплофизических свойств всех слоёв пакета материалов (коэффициенты теплопроводности $\lambda_i(t_i)$ и температуропроводности $a_i(t_i)$);

– толщины слоев пакета материалов R_i ;

– интегральная поглотательная способность материала верха A ;

– показатели интенсивности теплообмена между наружной и внутренней поверхностями пакета и окружающей средой (коэффициенты теплоотдачи на наружной и внутренней поверхности пакета α_n и α_v).

Измерения коэффициента теплопроводности материалов пакета и исследования зависимости этого параметра от температуры проводились на калориметре ИТ- λ -400, позволяющем определять коэффициент теплопроводности с погрешностью 5–7 % методом монотонного разогрева материала. Для определения коэффициента удельной теплоемкости материала пакета, а также для исследования зависимости этого параметра от температуры использовался калориметр ИТ- c -400, позволяющий определять коэффициент удельной теплоемкости с погрешностью 5–7 % методом монотонного разогрева материала в адиабатическом режиме.

Толщина материалов определялась толщиномером согласно ГОСТ 12.023-2003 Материалы текстильные и изделия из них. Методы определения толщины. Объемная плотность материалов определялась весовым методом, то есть взвешиванием пробы текстильного материала предварительно определенного объема.

Данные показатели ткани определены в лаборатории ГНУ «Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова» НАН Беларуси. Численные значения представлены в таблицах 2.2, 2.3.

Промежуточные значения $\lambda_i(t_i)$, $c_i(t_i)$, необходимые для расчета распределения температуры по толщине многослойного пакета материалов, не указанные в таблице 2.3, определены методом интерполяции [124]:

$$\lambda_i(t_i) = \lambda_{\min} + \frac{(\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) \cdot (t_i - t_{\min})}{t_{\max} - t_{\min}}, \quad (2.52)$$

$$c_i(t_i) = c_{\min} + \frac{(c_{\max} - c_{\min}) \cdot (t_i - t_{\min})}{t_{\max} - t_{\min}}, \quad (2.53)$$

где λ_{\max} , λ_{\min} , c_{\max} , c_{\min} , t_{\max} , t_{\min} – граничные значения коэффициентов теплопроводности, удельной теплоемкости и температуры между которыми находится текущее значение t_i .

Таблица 2.2 – Показатели геометрических свойств материалов пакета

Наименование материала	Объемная плотность ρ_i , кг/м ³	Толщина R_i , м
Материал верха	448	0,00055
Водонепроницаемый слой	753	0,00024
Теплоизоляционная подкладка	306	0,0044
Подкладочная ткань	816	0,0001

Таблица 2.3 – Коэффициенты теплопроводности и удельной теплоемкости материалов пакета

Температура t , °С	Коэффициент теплопроводности λ_i , Вт/(м·К)			
	Материал верха	Водонепроницаемый слой	Теплоизоляционная подкладка	Подкладочная ткань
25	0,104	0,126	0,087	0,059
50	0,103	0,131	0,082	0,060
75	0,106	0,134	0,091	0,060
100	0,111	0,146	0,093	0,064
125	0,121	0,152	0,107	0,067
150	0,125	0,154	0,109	0,068
	Коэффициент удельной теплоемкости c_i , Дж/(К·кг)			
25	1126	655	1243	649
50	1275	1135	1238	983
75	1290	1273	1397	1286
100	1275	1277	1468	1394
125	1328	1203	1630	1474
150	1585	1334	1755	1345

Коэффициенты температуропроводности материалов пакета определены с учетом данных из таблиц 2.2–2.3 и соотношений (2.52), (2.53) по формуле

$$a_i(t_i) = \frac{\lambda_i(t_i)}{c_i(t_i) \cdot \rho_i}.$$

Так как, по закону Кирхгофа, поглощательная способность серых тел совпадает со степенью черноты и не зависит от длины волны [79], то поглощательная способность материала верха численно равна степени его черноты: $\varepsilon_{\text{пов}} = 0,71$ [125].

Коэффициенты теплоотдачи определены экспериментально на основании численных значений температуры на наружной и внутренней поверхностях пакета, а так же плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета при наступлении стационарного режима.

Согласно [5] оценка показателей теплозащитных свойств пакета материалов производится в лабораторных условиях. Поэтому теплота от внутренней поверхности пакета передается воздуху путем свободной конвекции, так как в помещении вынужденное движение отсутствует. Помимо конвекции теплота от внутренней поверхности пакета передается окружающей среде за счет излучения. Таким образом, имеет место сложный теплообмен, заключающийся в сочетании радиационного теплообмена в прозрачной среде и переноса теплоты свободной конвекцией на вертикальной поверхности.

Так как размеры помещения существенно больше размеров пакета, то в данном случае имеет место частный случай теплообмена излучением между телом и оболочкой, когда размеры тела существенно меньше размеров оболочки. В этом случае лучистая составляющая коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности пакета определяется по формуле [79]

$$\alpha'_{\text{л}} = \sigma \varepsilon \cdot (T_{\text{в}} + T_{\text{с}})(T_{\text{в}}^2 + T_{\text{с}}^2), \quad (2.54)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана; ε – степень черноты подкладочной ткани; $T_{\text{в}}$ – температура внутренней поверхности пакета при стационарном тепловом режиме, К; $T_{\text{с}}$ – температура окружающей среды, К.

Для расчета конвективной составляющей коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности пакета использовалось уравнение подобия, описывающее свободную конвекцию на вертикальной пластине [56]

$$\text{Nu} = 0,76(\text{GrPr})^{0,25}, \quad (2.55)$$

где Nu – число Нуссельта; Gr – число Грасгофа; Pr – число Прандтля.

Число Грасгофа определено по формуле [56, 79]

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu^2}, \quad (2.56)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; β – коэффициент температурного расширения среды, 1/К; Δt – температурный напор, °С; l – определяющий размер, м; ν – кинематический коэффициент вязкости среды, м²/с;

В уравнениях подобия (2.55), (2.56) для расчета теплоотдачи от вертикальной стенки к воздуху определяющей температурой является температура среды, а определяющим размером – высота образца исследуемого пакета материалов [56]. Коэффициент температурного расширения для газов определен по формуле [56]

$$\beta = \frac{1}{T},$$

где T – определяющая температура, К.

Конвективная составляющая коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности пакета рассчитана по формуле [56, 79]

$$\alpha'_k = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{\text{ср}}}{l}, \quad (2.57)$$

где $\lambda_{\text{ср}}$ – коэффициент теплопроводности среды, Вт/м·К.

Благодаря тому, что среда прозрачна, конвективный и радиационный потоки аддитивны, коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности пакета, включающий конвективную и лучистую составляющую, равен

$$\alpha_b = \alpha'_l + \alpha'_k. \quad (2.58)$$

Тогда полная плотность теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов рассчитывалась по выражению [56, 79]

$$q_b = (\alpha'_l + \alpha'_k) \cdot (T_b - T_c) = \alpha_b \cdot (T_b - T_c), \quad (2.59)$$

где q_b – тепловой поток, который передается от внутренней поверхности пакета к среде при установившемся тепловом состоянии, Вт/м².

По [56, с. 319, таблица П-3] при температуре воздуха в испытательной лаборатории $t_c = 20$ °С и давлении $p = 98,1$ кПа определены: коэффициент теплопроводности сухого воздуха при $p = 0,0981$ МПа: $\lambda_{\text{ср}} = 2,59 \cdot 10^{-2}$ Вт/м; кинематический коэффициент вязкости сухого воздуха: $\nu = 15,06 \cdot 10^{-6}$ м²/с и число Прандтля: $\text{Pr} = 0,703$.

Так как при стационарном режиме тепловой поток, проходящий через любую изотермическую поверхность неоднородной стенки, является величиной постоянной [121]:

$$\frac{\partial q}{\partial x} = 0,$$

то с учетом граничных условий (2.3), (2.4) при известных температурах на внешних поверхностях и плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов можно составить систему уравнений:

$$\begin{cases} q_B = A \cdot q_{\text{п}} - \alpha_{\text{н}} \cdot T_{\text{н}}, \\ q_B = \alpha_{\text{в}} \cdot (T_{\text{в}} - T_{\text{с}}), \end{cases} \quad (2.60)$$

где $T_{\text{н}}$ – температура на наружной поверхности пакета материалов при стационарном тепловом режиме, К.

Таким образом, коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности пакета с учетом системы уравнений (2.60) равен:

$$\alpha_{\text{н}} = \frac{A \cdot q_{\text{п}} - q_B}{T_{\text{н}}}. \quad (2.61)$$

Численные значения коэффициентов теплоотдачи для данного пакета материалов БОП при различном уровне теплового воздействия сведены в таблицы 2.4, 2.5.

Таблица 2.4 – Результаты расчета коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности пакета материалов при различном уровне теплового воздействия

Наименование показателя	Плотность потока теплового воздействия $q_{\text{п}}$, Вт/м ²					
	1000	2000	3000	4000	5000	
Температура на внутренней поверхности пакета $t_{\text{в}}$, °С	34	45	56	65	74	
Температурный напор Δt , °С	14	25	36	45	54	
Число Грасгофа Gr (2.56)	2067	3691	5314	6643	7972	
Число Нуссельта Nu (2.55)	4,69	5,42	5,94	6,28	6,58	
Конвективная составляющая коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности пакета $\alpha'_{\text{к}}$, Вт/(м ² ·К) (2.57)	12,15	14,05	15,39	16,27	17,03	
Лучистая составляющая коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности пакета $\alpha'_{\text{л}}$, Вт/(м ² ·К) (2.54)	5,52	5,83	6,16	6,45	6,74	
Коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности пакета $\alpha_{\text{в}}$, Вт/(м ² ·К) (2.58)	17,67	19,88	21,55	22,72	23,77	
Плотность теплового потока на внутренней поверхности пакета $q_{\text{в}}$, Вт/м ²	Экспериментальные данные	261	525	802	1062	1330
	Результаты расчета (2.59)	247	497	776	1022	1283
Отклонение δ , %	5,2	5,3	3,3	3,7	3,5	

Примечание. Отклонение – относительная разница между экспериментальными данными и результатами расчета по формуле (2.59): $\delta = 100 \cdot |q_{\text{в}}^{\text{Э}} - q_{\text{в}}^{\text{Р}}| / q_{\text{в}}^{\text{Э}}$,

где $q_v^{\text{э}}$ – экспериментальные данные плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета, Вт/м²; $q_v^{\text{р}}$ – плотность теплового потока на внутренней поверхности пакета, полученная по формуле (2.59), Вт/м².

Таблица 2.5 – Результаты расчета коэффициента теплоотдачи на наружной поверхности пакета материалов при различном уровне теплового воздействия

Наименование показателя	Плотность потока теплового воздействия $q_{\text{п}}$, Вт/м ²				
	1000	2000	3000	4000	5000
Плотность теплового потока на внутренней поверхности пакета q_v , Вт/м ²	247	497	776	1022	1283
Температура на наружной поверхности пакета t_n , °С	56	87	114	142	164
Коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности пакета α_v , Вт/(м ² ·К) (2.61)	1,41	2,56	3,5	4,38	5,19

Анализ результатов исследования коэффициентов теплоотдачи пакета материалов БОП при различном уровне теплового воздействия, позволяет отметить, что:

- увеличение плотности падающего теплового потока в диапазоне от 1000 до 5000 Вт/м² приводит к закономерному увеличению коэффициентов теплоотдачи на наружной (α_n) и внутренней (α_v) поверхности пакета;

- зависимость коэффициентов теплоотдачи от уровня теплового воздействия в исследованном диапазоне носит ярко выраженный линейный характер;

- отклонение расчетных значений плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета (q_v) от экспериментальных данных не превышает 5,5 %.

2.3.2 Исследования распределения температуры в многослойном пакете материалов для боевой одежды пожарных при различном тепловом воздействии

На основании численных значений показателей теплофизических свойств и толщины слоев пакета, а так же степени черноты материала верха и показателей интенсивности теплообмена между внешними поверхностями пакета и окружающей средой при помощи зонального метода расчета процесса теплопередачи в многослойном пакете материалов получены распределения температуры по толщине каждого слоя пакета в зависимости от уровня и времени теплового воздействия.

Для оценки адекватности зонального метода расчета процесса

теплопередачи в многослойном пакете получены экспериментальные и расчетные зависимости изменения температур на внутренней и внешней поверхностях для всех слоев пакета материалов, а также плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета. Некоторые результаты экспериментальных и расчетных исследований процессов нестационарной теплопроводности в многослойном пакете материалов представлены на рисунках 2.12, 2.13, 2.14 [123].

Для оценки полученных экспериментальных и расчетных данных воспользуемся нормативным показателем теплофизических свойств пакета – *коэффициент ослабления инфракрасного излучения*, который рассчитывается по формуле [126]

$$K_{\text{осл}} = \frac{q_{\text{п}} - q_{\text{в}}}{q_{\text{п}}} \cdot 100 \%,$$

а также, по аналогии с представленным выше показателем, введен другой показатель – *коэффициент снижения температуры по слоям*, который рассчитывается по формуле

$$K_i = \frac{t_i(0) - t_i(R_i)}{t_{\text{н}} - t_{\text{в}}} \cdot 100 \%,$$

где $t_i(0)$, $t_i(R_i)$ – температура на наружной и внутренней поверхности i -го слоя пакета при стационарном режиме, °С.

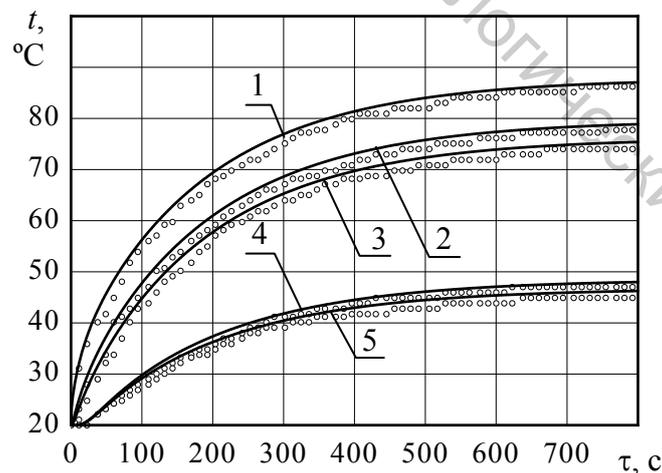


Рисунок 2.12 – Зависимость температуры от времени по слоям пакета материалов при плотности теплового воздействия $q_{\text{п}} = 2000 \text{ Вт/м}^2$:

- 1 – на наружной поверхности пакета; 2 – между материалом верха и водонепроницаемым слоем; 3 – между водонепроницаемым слоем и теплоизоляционной подстежкой; 4 – между теплоизоляционной подстежкой и подкладочной тканью; 5 – на внутренней поверхности пакета
- – математическое моделирование испытаний; ○ – экспериментальные данные

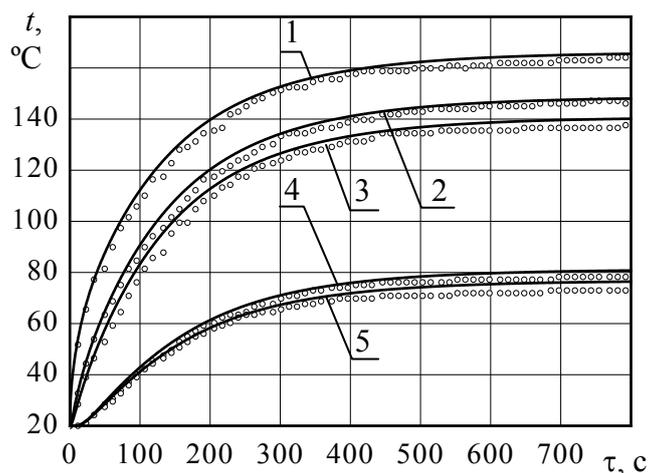


Рисунок 2.13 – Зависимость температуры от времени по слоям пакета материалов при плотности теплового воздействия $q_{п} = 5000 \text{ Вт/м}^2$:

1 – на наружной поверхности пакета; 2 – между материалом верха и водонепроницаемым слоем; 3 – между водонепроницаемым слоем и теплоизоляционной подстежкой; 4 – между теплоизоляционной подстежкой и подкладочной тканью; 5 – на внутренней поверхности пакета
 — – математическое моделирование испытаний; ○ – экспериментальные данные

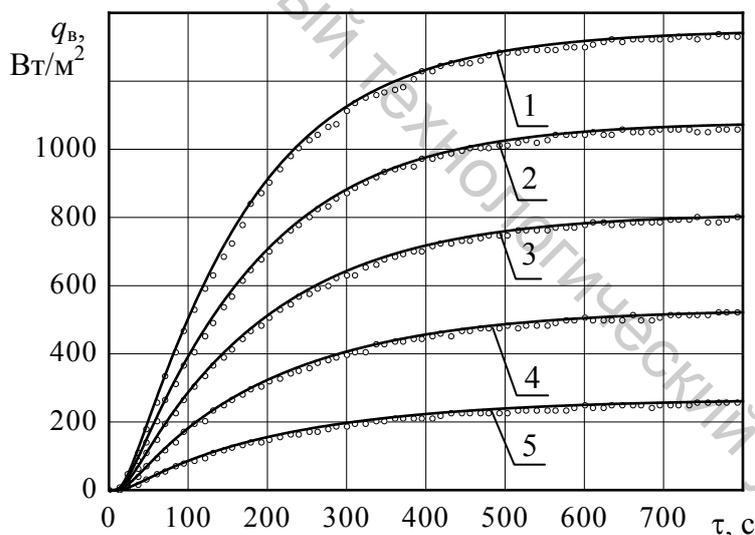


Рисунок 2.14 – Зависимость плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов от времени при различной плотности теплового воздействия:

1 – $q_{п} = 5000 \text{ Вт/м}^2$; 2 – $q_{п} = 4000 \text{ Вт/м}^2$; 3 – $q_{п} = 3000 \text{ Вт/м}^2$;
 4 – $q_{п} = 2000 \text{ Вт/м}^2$; 5 – $q_{п} = 1000 \text{ Вт/м}^2$

— – математическое моделирование испытаний; ○ – экспериментальные данные

Коэффициенты ослабления инфракрасного излучения пакета и коэффициенты снижения температуры по слоям пакета при различном уровне теплового воздействия, полученные на основании экспериментальных и расчетных значений температур на наружной и внутренней поверхностях всех слоев пакета и теплового потока внутренней поверхности пакета при стационарном режиме, представлены в таблицах 2.6, 2.7.

Таблица 2.6 – Коэффициент ослабления инфракрасного излучения пакета материалов БОП при различном уровне теплового воздействия

Плотность теплового воздействия q_n , Вт/м ²	Плотность теплового потока на внутренней поверхности пакета q_v , Вт/м ²		Коэффициент ослабления инфракрасного излучения $K_{осл}$, %		Отклонение δ , %
	$q_v^{\text{Э}}$	$q_v^{\text{Р}}$	$K_{осл}^{\text{Э}}$	$K_{осл}^{\text{Р}}$	
1000	261	266	73,9	73,4	0,7
2000	525	528	73,8	73,6	0,2
3000	802	809	73,3	73,0	0,3
4000	1062	1079	73,5	73,0	0,6
5000	1330	1348	73,4	73,0	0,5

Примечание. Отклонение – относительная разница между коэффициентами ослабления инфракрасного излучения пакета материалов, полученных по экспериментальным данным и по результатам зонального метода расчета процесса теплопередачи в многослойном пакете: $\delta = 100 \cdot |K_{осл}^{\text{Э}} - K_{осл}^{\text{Р}}| / K_{осл}^{\text{Э}}$, где $K_{осл}^{\text{Э}}$ – коэффициент ослабления инфракрасного излучения пакета материалов по экспериментальным данным, %; $K_{осл}^{\text{Р}}$ – коэффициент ослабления инфракрасного излучения пакета материалов по результатам зонального метода расчета, %.

Анализ полученных результатов позволяет отметить, что [123]:

– разность экспериментальной и расчётной температуры для всех слоев пакета при различной плотности падающего теплового потока на протяжении всего процесса нагревания составляет не более 5,5 %;

– разность экспериментальной и расчётной плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета при различной плотности падающего теплового потока на протяжении всего процесса нагревания составляет не более 7 %;

– разность экспериментального и расчётного значения коэффициента ослабления инфракрасного излучения пакета при различном уровне теплового воздействия составляет не более 1 %;

– коэффициент ослабления инфракрасного излучения пакета материалов при различном уровне теплового воздействия практически не меняется и находится в диапазоне $K_{осл}^{\text{Э}} = 73,3\text{--}73,9$ % ($K_{осл}^{\text{Р}} = 73,0\text{--}73,6$ %);

Таблица 2.7 – Коэффициент снижения температуры по слоям пакета материалов БОП при различном уровне теплового воздействия

Плотность потока теплового воздействия $q_{\text{т}}, \text{Вт/м}^2$	Температура на поверхности i -го слоя пакета материалов при стационарном тепловом режиме $t_i, ^\circ\text{C}$										Коэффициент снижения температуры $K_i, \%$							
	$t_1(0)^{\ominus}$	$t_1(0)^{\text{P}}$	$t_2(0)^{\ominus}$	$t_2(0)^{\text{P}}$	$t_3(0)^{\ominus}$	$t_3(0)^{\text{P}}$	$t_4(0)^{\ominus}$	$t_4(0)^{\text{P}}$	$t_4(R_4)^{\ominus}$	$t_4(R_4)^{\text{P}}$	K_1		K_2		K_3		K_4	
											K_1^{\ominus}	K_1^{P}	K_2^{\ominus}	K_2^{P}	K_3^{\ominus}	K_3^{P}	K_4^{\ominus}	K_4^{P}
1000	56	56	51	52	49	50	35	36	34	35	22,7	19,0	9,1	9,5	63,6	66,7	4,5	4,8
2000	87	88	79	79	75	76	47	48	45	47	19,0	22,0	9,5	7,3	66,7	68,3	4,8	2,4
3000	114	117	103	105	98	100	59	60	56	58	19,0	20,3	8,6	8,5	67,2	67,8	5,2	3,4
4000	142	143	126	128	121	121	70	71	65	67	20,8	19,7	6,5	9,2	66,2	65,8	6,5	5,3
5000	164	166	146	148	138	141	79	81	74	77	20,0	20,2	8,9	7,9	65,6	67,4	5,6	4,5

Примечания.

1. $t_1(0)$ – температура на наружной поверхности материала верха, $^\circ\text{C}$; $t_2(0)$ – температура на наружной поверхности водонепроницаемого слоя, $^\circ\text{C}$; $t_3(0)$ – температура на наружной поверхности теплоизоляционной подстежки, $^\circ\text{C}$; $t_4(0)$ – температура на наружной поверхности подкладочной ткани, $^\circ\text{C}$; $t_4(R_4)$ – температура на внутренней поверхности подкладочной ткани, $^\circ\text{C}$; $t_1(0) = t_{\text{н}}$; $t_4(R_4) = t_{\text{в}}$.

2. K_1 – коэффициент снижения температуры для материала верха, %; K_2 – коэффициент снижения температуры для водонепроницаемого слоя, %; K_3 – коэффициент снижения температуры для теплоизоляционной подстежки, %; K_4 – коэффициент снижения температуры для подкладочной ткани, %.

– основным слоем, снижающим тепловое воздействие, является третий слой – теплоизоляционная подкладка, его коэффициент снижения температуры при плотности теплового воздействия от 1000 до 5000 Вт/м² равен $K_3^{\ominus} = 63,6\text{--}67,2\%$ ($K_3^{\text{P}} = 65,8\text{--}68,3\%$), следующим по значимости на уровень снижения температуры идет первый слой – материал верха, его коэффициент снижения температуры равен $K_1^{\ominus} = 19,0\text{--}22,7\%$ ($K_1^{\text{P}} = 19,0\text{--}22,0\%$);

Таким образом, в результате проведенного комплекса исследований появляется возможность проектирования состава многослойного пакета материалов БОП, что приводит к существенному сокращению временных и материальных затрат при проведении нормативных испытаний по определению устойчивости пакета к воздействию теплового потока [123].

РЕЗЮМЕ

1. Разработаны математические модели и алгоритмы расчета распределения температуры в многослойном пакете материалов при нормативных испытаниях на устойчивость к тепловому воздействию с учетом зависимости показателей теплофизических свойств материалов пакета от температуры, позволяющие на стадии проектирования пакета материалов для боевой одежды пожарных осуществить научно обоснованный выбор его состава, а также снизить уровень временных и материальных затрат на проведение испытаний.

2. В результате проведенного комплекса исследований установлено, что разработанные математические модели распределения температуры в многослойном пакете при нормативных испытаниях на устойчивость к тепловому воздействию адекватны результатам эксперимента, разность экспериментальной и расчётной температуры для всех слоев пакета при различной плотности падающего теплового потока на протяжении всего процесса нагревания составляет не более 5,5 %, а разность экспериментальной и расчётной плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета – не более 7 %.

3. Установлено, что коэффициент ослабления инфракрасного излучения пакета материалов при различном уровне теплового воздействия практически не меняется и находится в диапазоне $K_{\text{осл}} = 73,3\text{--}73,9\%$ (по результатам эксперимента) и $K_{\text{осл}} = 73,0\text{--}73,6\%$ (по результатам моделирования), разность экспериментального и расчётного значения составляет не более 1 %. Слой с максимальными теплозащитными свойствами в пакете материалов является третий слой – теплоизоляционная подкладка, коэффициент снижения температуры $K_3^{\text{э}} = 63,6\text{--}67,2\%$ ($K_3^{\text{р}} = 65,8\text{--}68,3\%$).

ГЛАВА 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ПАКЕТОВ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ БОЕВОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ ПРИ РАЗЛИЧНОМ УРОВНЕ ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Боевая одежда пожарных (БОП) должна защищать пожарного от тепловых и механических воздействий, воды и агрессивных сред при проведении работ по тушению пожаров и связанных с ними аварийно-спасательных работ. Эксплуатационные свойства БОП зависят как от конструктивного исполнения, так и от используемых для ее изготовления материалов. Полная и всесторонняя оценка защитных свойств материалов и тканей, используемых при изготовлении БОП, позволяет снизить риск ее отказа во время эксплуатации [4].

Из множества поражающих факторов, действующих при тушении пожаров, к травматизму и гибели сотрудников МЧС наиболее часто приводят тепловые факторы пожара: воздействие высокой температуры окружающей среды, тепловых потоков, открытого пламени и контакт с нагретыми поверхностями [4].

Целью теоретических и экспериментальных исследований, проводимых в данной главе, является разработка экспресс-методов комплексной оценки теплозащитных свойств материалов, применяемых для изготовления боевой одежды пожарных. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие основные задачи:

- выбор и теоретическое обоснование показателей, характеризующих теплозащитные свойства боевой одежды пожарных при тепловом воздействии;
- исследования влияния плотности теплового воздействия на показатели теплофизических свойств пакета материалов боевой одежды пожарных;
- разработка методов комплексной оценки теплозащитных свойств материалов и их пакетов, применяемых для изготовления боевой одежды пожарных, по результатам кратковременных испытаний.

3.1 Теоретическое обоснование показателей, характеризующих теплозащитные свойства боевой одежды пожарных при различном уровне теплового воздействия

Согласно действующим в Республике Беларусь ТНПА, показателем теплофизических свойств пакета материалов СЗО пожарных при

тепловом воздействии является устойчивость к воздействию теплового потока, которая определяется плотностью падающего теплового потока и соответствующим временем переносимости. Численные значения показателей теплофизических свойств пакета материалов БОП, соответствующие нормативным требованиям, представлены в таблице 1.2 [5].

Данная форма оценки теплозащитных свойств БОП имеет ряд существенных недостатков:

1. Оценка теплофизических показателей пакета материалов БОП для определенного теплового воздействия происходит только на качественном уровне. Требования к пакету материалов не содержат количественной оценки результатов испытания. Пакет материалов либо выдержал, либо не выдержал испытания. Следовательно, проведение сравнительного анализа уровня защиты двух, прошедших испытание пакетов материалов, не представляется возможным.

2. В реальных условиях проведения аварийно-спасательных работ пожарный сталкивается с гораздо более широким спектром теплового воздействия как по плотности теплового потока, так и временем его действия, чем указано в СТБ.

С целью совершенствования системы оценки БОП, диагностирования технического состояния и определения его тактических возможностей целесообразнее использовать следующую характеристику, заданную графически или функционально [4, 51, 127]:

$$\tau^* = f(q_n), \quad (3.1)$$

где τ^* – время безопасной эксплуатации БОП, с; q_n – плотность теплового потока, падающего на наружную поверхность БОП, Вт/м².

В качестве критерия для оценки времени безопасной эксплуатации можно использовать нормативные требования к пакетам материалов, выдержавшим испытания на устойчивость к воздействию теплового потока [5, 128]:

– рост температуры на внутренней поверхности пакета материала в течение испытания не более чем на 50 °С от начального значения;

– увеличение плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов до значения, равного 2500 Вт/м².

Перечисленные показатели аналогичны критерию безотказной работы защитной одежды пожарных при эксплуатации, которым является предельное значение температуры подкостюмного пространства в течение времени работы [126].

Характеристика (3.1) будет в полной мере отражать взаимосвязь между основными показателями назначения защитной одежды пожарных и являться основой для ее правильной эксплуатации.

В качестве основных предпосылок при подборе аппроксимирующей зависимости для характеристики (3.1) приняты следующие положения:

1. Характеристикой защитной одежды пожарных может быть изотерма предельной температуры, имеющая гиперболический вид. Предельная температура T^* – это температура на внутренней поверхности пакета материалов, равная начальному значению температуры пакета плюс 50 °С.

2. Наличие такой величины плотности теплового потока, который не вызовет нагрев внутренней поверхности БОП более T^* при неограниченном времени воздействия.

На основании вышесказанного аппроксимирующая зависимость может иметь вид (рис. 3.1) [128–130]:

$$\tau^* = B \cdot \ln \frac{q_{\text{п}}}{q_{\text{п}} - q_0}, \text{ при } T^* = \text{const}, \quad (3.2)$$

где q_0 – плотность потока теплового воздействия, который не вызовет нагрев наружной поверхности БОП более T^* при неограниченном времени воздействия, Вт/м²; B – экспериментально определяемый параметр, с.

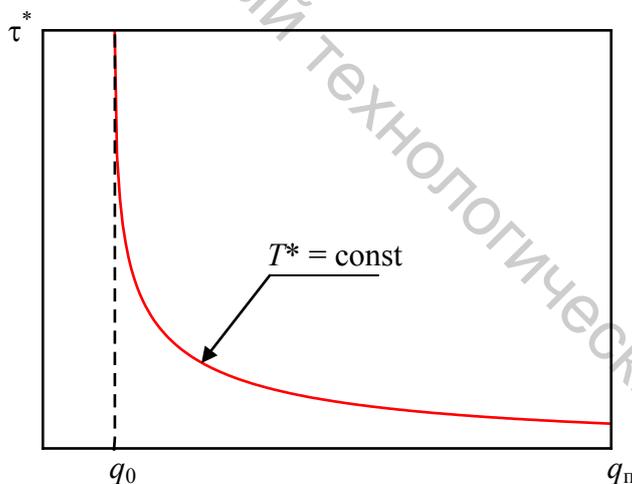


Рисунок 3.1 – Типовая зависимость времени безопасной эксплуатации БОП от плотности теплового воздействия

Выражение (3.2) имеет важное практическое значение для оценки теплозащитных свойств защитной одежды пожарных. Для удобства дальнейшего использования назовем q_0 – предельной плотностью теплового воздействия для безопасной эксплуатации, которая имеет следующий физический смысл: при неограниченном времени воздействия теплового потока плотностью q_0 температура на внутренней поверхности защитной одежды пожарных возрастет на 50 °С.

Данный показатель теплозащитных свойств может быть использован в качестве основного показателя назначения защитной одежды пожарных, а также на основании нормативно установленных значений предельной плотности теплового воздействия целесообразно производить классификацию теплозащитной одежды пожарных на типы.

Для определения физического смысла параметра B выражение (3.2) было приведено к виду:

$$\frac{\tau^*}{B} = \ln \frac{q_{\text{п}}}{q_{\text{п}} - q_0} \Rightarrow \exp\left(\frac{\tau^*}{B}\right) = \frac{q_{\text{п}}}{q_{\text{п}} - q_0}.$$

Если $B = \tau^*$, то:

$$\frac{q_{\text{п}}}{q_{\text{п}} - q_0} = e \Rightarrow q_{\text{п}} = q_0 \frac{e}{e - 1},$$

где e – основание натурального логарифма.

Следовательно, параметр B имеет размерность [с] и является временем безопасной эксплуатации БОП при тепловом воздействии большем, чем предельная плотность теплового потока в $\frac{e}{e-1}$ раз.

С другой стороны, если зависимость времени безопасной эксплуатации БОП от плотности теплового воздействия (3.2) (рис. 3.2), преобразовать к линейному виду (рис. 3.3), то из геометрических соображений следует

$$B = \text{tg } \alpha = \frac{\tau^*}{\ln \frac{q_{\text{п}}}{q_{\text{п}} - q_0}},$$

где α – угол наклона кривой $\tau^* = f\left(\ln \frac{q_{\text{п}}}{q_{\text{п}} - q_0}\right)$ к оси абсцисс.

Следовательно, параметр B зависимости (3.2) является темповым показателем, определяющим темп снижения времени безопасной эксплуатации БОП при увеличении плотности теплового воздействия.

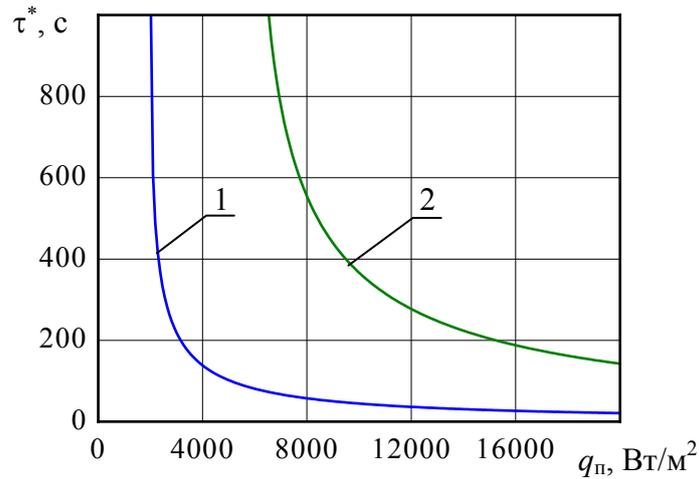


Рисунок 3.2 – Зависимости времени потенциально безопасной эксплуатации БОП от плотности теплового воздействия:

1 – $q_0 = 2000 \text{ Вт/м}^2$, $B = 200 \text{ с}$; 2 – $q_0 = 6000 \text{ Вт/м}^2$, $B = 400 \text{ с}$

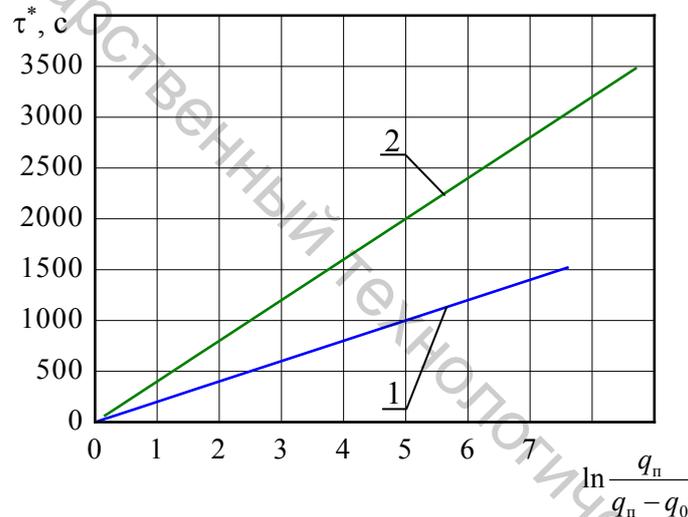


Рисунок 3.3 – Зависимости времени потенциально безопасной эксплуатации

БОП от $\ln \frac{q_{п}}{q_{п} - q_0}$:

1 – $q_0 = 2000 \text{ Вт/м}^2$, $B = 200 \text{ с}$; 2 – $q_0 = 6000 \text{ Вт/м}^2$, $B = 400 \text{ с}$

Оценку параметров модели (3.2) рекомендуется производить либо введением масштабной линеаризующей функции $u(q_{п})$, такой, чтобы в координатах (u, τ^*) зависимость $\tau^*(u)$ имела линейный вид, либо используя современные средства вычислительной техники, например, математический статистический пакет Statistica for Windows.

Таким образом, на основании проведенных исследований получена математическая зависимость, позволяющая прогнозировать значение времени безопасной эксплуатации БОП при различной плотности теплового воздействия. Отличительной особенностью данной зависимо-

сти является тот факт, что ее параметры имеют строго определенный физический смысл и характеризуют теплофизические свойства боевой одежды пожарных при тепловом воздействии.

3.2 Экспериментальные исследования закономерностей изменения теплозащитных показателей пакета материалов боевой одежды пожарных при различном уровне теплового воздействия

3.2.1 Комплексное исследование процесса теплопереноса в пакете материалов и определение времени безопасной эксплуатации боевой одежды пожарных

Математическая зависимость (3.2) позволяет определить время безопасной эксплуатации боевой одежды пожарных при любой плотности теплового воздействия. Параметры q_0 и B зависимости (3.2) можно получить, например, методом имитационного моделирования испытаний или на основании результатов экспериментальных исследований.

Имитационное моделирование является чрезвычайно мощным и гибким инструментом исследования, позволяющим воспроизводить практически любые ситуации в процессе проведения испытания, а также значительно снизить уровень временных и материальных затрат на проведение испытаний.

Имитационное моделирование применялось для исследования процессов испытания пакета материалов на устойчивость к воздействию теплового потока различного уровня. Температура и плотность теплового потока на внутренней поверхности пакета в течение испытания определялись при помощи зонального метода расчета процесса теплопередачи в многослойном пакете материалов с учетом рациональных режимов моделирования: шаг по времени $\Delta\tau = 0,5$ с; шаг по толщине слоя $\Delta\eta_i = 0,01$ ($i = 1, \dots, 4$); количество членов сходящегося ряда аналитических решений $n = 6$.

В качестве объекта исследования использовался пакет материалов, применяемый при изготовлении БОП в Республике Беларусь и состоящий из *материала верха* – огнезащитная ткань «ЛЕОНИД» (метаарамид – 93 %, параарамид – 5 %, антистатик – 2 %) комбинированного переплетения рип-стоп, в основе и утке которой использовались крученые нити линейной плотности 20 текс $\times 2$ из метаарамидных и параарамидных волокон, ткань с поверхностной плотностью 240 г/м², плотностью по основе 338 нитей на 10 см, а по утку – 246 нитей на 10 см.; *водонепроницаемого слоя* – ткань водупорная «СISУ» (хлопок 23 %, полиэфир 77 %) полотняного переплетения с полиуретановым покрытием поверхностной плотности 169 г/м²; *теплоизоляционной подстежки* – не-

тканое холстопршивное полотно (полиэфир – 50 %, арселон – 50 %) с поверхностной плотностью 300 г/м²; *подкладочной ткани* – полиэфирная ткань полотняного переплетения с поверхностной плотностью 80 г/м².

Численные значения коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости, объемной плотности, толщин материалов пакета представлены в таблицах 2.2, 2.3. Теплофизические коэффициенты материалов пакета определены с учетом данных из таблицы 2.3. Промежуточные значения не указанные в таблице 2.3 определялись методом интерполяции [124].

Численные значения коэффициентов теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях пакета при тепловом воздействии от 1000 до 10000 Вт/м² определены экспериментально и представлены в таблице 3.1. Промежуточные значения коэффициентов теплоотдачи не указанные в таблице 3.1 определялись методом интерполяции [124].

Таблица 3.1 – Коэффициенты теплоотдачи при различном уровне теплового воздействия

Плотность потока теплового воздействия $q_{\text{п}}$, Вт/м ²	Коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности пакета $\alpha_{\text{в}}$, Вт/(м ² ·К)	Коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности пакета $\alpha_{\text{н}}$, Вт/(м ² ·К)
1000	17,67	1,41
2000	19,88	2,56
3000	21,55	3,5
4000	22,72	4,38
5000	23,77	5,19
6000	24,23	5,33
7000	25,78	6,26
8000	27,36	7,1
9000	28,86	8,05
10000	30,04	8,86

При проведении имитационного моделирования принималось, что начальная температура материалов пакета и окружающей среды равны 20 °С, а величина плотности потока теплового воздействия на первом этапе – 1000 Вт/м².

Имитационное моделирование испытания состояло из ряда последовательных этапов, на каждом из которых значение теплового воздействия на пакет материалов повышалось на величину $\Delta q_{\text{п}} = 50$ Вт/м². В ходе моделирования производился расчет температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета в зависимости от времени теплового воздействия. В момент выполнения условий:

- $t_{\text{в}} > 70$ °С или $q_{\text{в}} > 2500$ Вт/м²;
- установился стационарный тепловой режим при $t_{\text{в}} < 70$ °С,

имитационное моделирование процесса теплопереноса на данном этапе прекращалось и осуществлялось на следующем этапе с увеличением теплового воздействия на Δq .

Некоторые результаты имитационного моделирования процесса теплопереноса в пакете материалов БОП при испытании на устойчивость к воздействию теплового потока представлены на рисунках 3.4, 3.5.

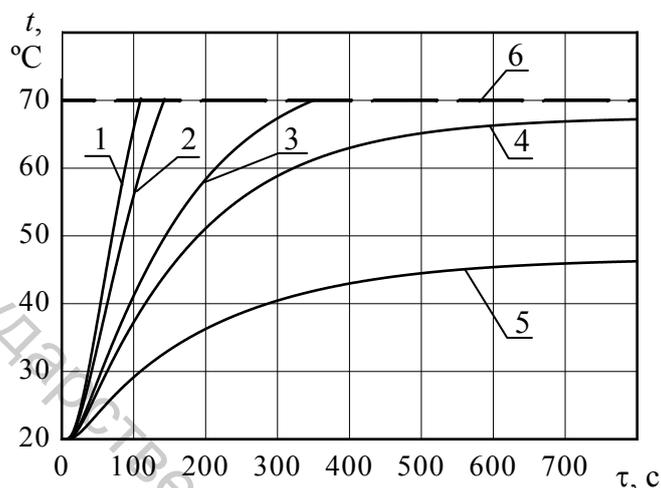


Рисунок 3.4 – Зависимость температуры на внутренней поверхности пакета от времени при различной плотности теплового воздействия:
 1 – $q_n = 10000 \text{ Вт/м}^2$; 2 – $q_n = 8000 \text{ Вт/м}^2$; 3 – $q_n = 5000 \text{ Вт/м}^2$; 4 – $q_n = 4000 \text{ Вт/м}^2$;
 5 – $q_n = 2000 \text{ Вт/м}^2$; 6 – граница безопасной эксплуатации

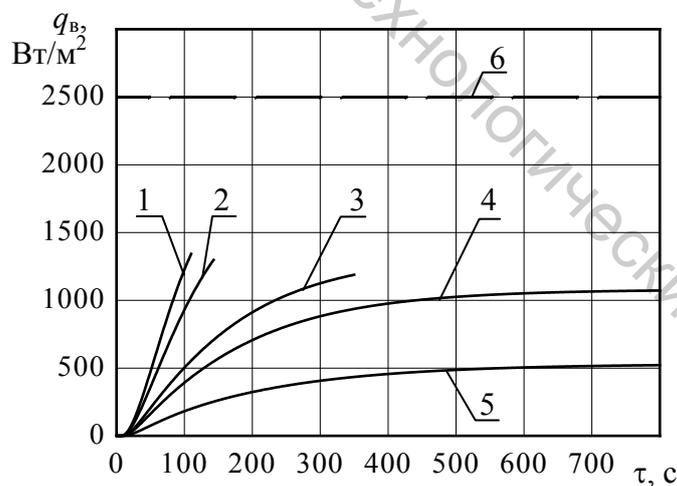


Рисунок 3.5 – Зависимость плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета от времени при различной плотности теплового воздействия:
 1 – $q_n = 10000 \text{ Вт/м}^2$; 2 – $q_n = 8000 \text{ Вт/м}^2$; 3 – $q_n = 5000 \text{ Вт/м}^2$; 4 – $q_n = 4000 \text{ Вт/м}^2$;
 5 – $q_n = 2000 \text{ Вт/м}^2$; 6 – граница безопасной эксплуатации

В результате анализа результатов имитационного моделирования установлено, что:

– увеличение плотности теплового воздействия приводит к закономерному увеличению темпа роста температуры и плотности тепло-

го потока на внутренней поверхности пакета материалов и, соответственно, к уменьшению времени безопасной эксплуатации БОП;

– при неограниченном времени теплового воздействия в диапазоне от 1000 до 4200 Вт/м² максимальная температура на внутренней поверхности пакета материалов составляет $t_b < 70$ °С, то есть $\Delta t_b < 50$ °С;

– при неограниченном времени теплового воздействия в диапазоне от 1000 до 10000 Вт/м² максимальная плотность теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов составляет $q_b < 2500$ Вт/м²;

– значение предельной плотности теплового воздействия для безопасной эксплуатации находится в диапазоне $4200 < q_0 < 4250$ Вт/м².

На основании вышеизложенного было принято, что в качестве основного и единственного критерия для оценки времени безопасной эксплуатации пакета материалов БОП можно использовать рост температуры на внутренней поверхности пакета материала в течение испытания [128].

На основании результатов имитационного моделирования получена зависимость времени безопасной эксплуатации пакета материалов БОП от плотности теплового воздействия.

Для сравнительного анализа зависимость $\tau^* = f(q_n)$ получена экспериментально.

При проведении экспериментальных исследований применялось испытательное оборудование и средства измерений, приведенные в таблице 2.1.

Для исследований было отобрано пять проб пакета материалов размером 210×70 мм. Перед испытаниями пробы материалов были выдержаны в климатических условиях по ГОСТ 10681 и тщательно визуально осмотрены для выявления видимых дефектов, комплектности, состояния поверхностей.

Диапазон теплового воздействия, условия проведения и прекращения этапа экспериментальных исследований идентичны принятым при имитационном моделировании. Рост теплового воздействия на каждом этапе исследований соответствовал $\Delta q_n = 500$ Вт/м².

Методика проведения экспериментальных исследований времени безопасной эксплуатации пакета материалов БОП при различной плотности теплового воздействия состоит из следующей последовательности шагов:

1. Подключают радиационную панель и систему охлаждения установки по определению устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов, а также регистрирующие приборы к источникам электропитания и водоснабжения, соответственно.

2. Радиационную панель прогревают в течение (25±5) мин от

начала подключения к источнику электропитания.

3. Поднимают защитную заслонку радиационной панели, открывая доступ теплового потока к датчику для измерения плотности теплового потока.

4. Изменяя расстояние между радиационной панелью и датчиком для измерения теплового потока, устанавливают держатель образца на таком расстоянии, при котором значение плотности теплового потока, попадающего на образец, равно требуемому значению.

5. Опускают заслонку и фиксируют расстояние от радиационной панели до держателя образца.

6. Устанавливают пакет материалов на держателе с помощью зажимов и устройства натяжения.

7. Поднимают защитную заслонку радиационной панели и выдерживают пакет материалов под действием теплового потока установленной плотности до наступления в нем стационарного теплового режима.

8. Регистрируют плотность теплового потока и температуру на внутренней поверхности пакета материалов.

9. В момент выполнения условий:

– $t_b > 70 \text{ }^\circ\text{C}$ или $q_b > 2500 \text{ Вт/м}^2$;

– установился стационарный тепловой режим в пакете при $t_b < 70 \text{ }^\circ\text{C}$,

защитную заслонку радиационной панели опускают. Пакет изымается из держателя. Далее увеличивается значение плотности потока теплового воздействия, и повторяются шаги 3–8.

Результаты, полученные в ходе имитационного моделирования испытаний и экспериментальных исследований пакета материалов БОП, представлены на рисунке 3.6 [129].

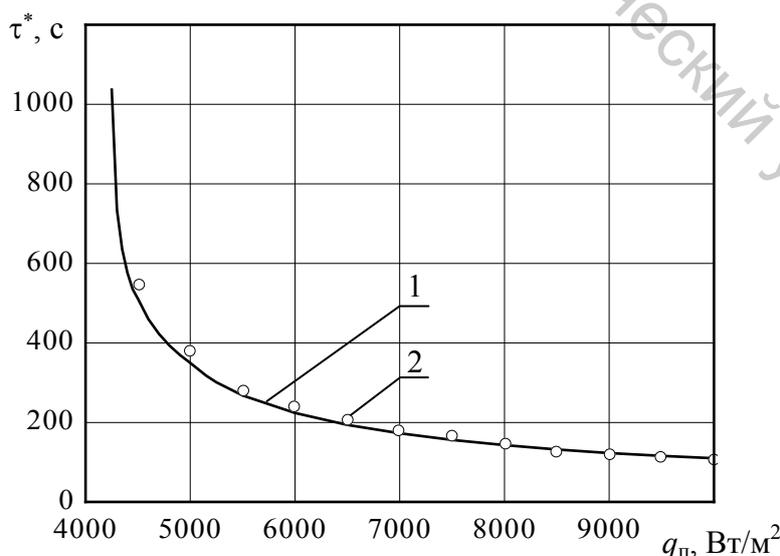


Рисунок 3.6 – Зависимость времени безопасной эксплуатации пакета материалов БОП от плотности теплового воздействия:

1 – имитационное моделирование испытаний; 2 экспериментальные данные

Численные значения времени безопасной эксплуатации пакета материалов, полученные в ходе имитационного моделирования испытаний и экспериментальных исследований, при одинаковых значениях плотности теплового воздействия представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Время безопасной эксплуатации пакета материалов, полученное по результатам имитационного моделирования испытаний и экспериментальных исследований

Плотность потока теплового воздействия $q_{п}$, Вт/м ²	Время безопасной эксплуатации пакета материалов τ^* , с		Отклонение δ , %
	Экспериментальные исследования	Имитационное моделирование испытаний	
4500	546	511	6,4
5000	378	350	7,4
5500	282	268	5,0
6000	240	224	6,7
6500	204	194	4,9
7000	180	173	3,9
7500	168	156	7,1
8000	144	143	0,7
8500	126	132	4,8
9000	120	123	2,5
9500	114	116	1,8
10000	108	110	1,9

Примечание. Отклонение – относительная разница между экспериментальными данными и результатами имитационного моделирования : $\delta = 100 \cdot \left| \tau^{*Э} - \tau^{*М} \right| / \tau^{*Э}$, где $\tau^{*М}$ – время безопасной эксплуатации пакета материалов, полученное в ходе экспериментальных исследований, с; $\tau^{*Э}$ – время безопасной эксплуатации пакета материалов, полученное по результатам имитационного моделирования испытаний, с.

В результате проведенных исследований установлено, что [128]:

– время потенциально безопасной эксплуатации пакета, полученное по результатам имитационного моделирования испытаний, обладает достаточно высокой сходимостью с результатами, полученными в ходе экспериментальных исследований. Максимальное отклонение не превышает 7,5 %. Необходимо отметить, что измерение температуры на внутренней поверхности пакета в ходе экспериментальных исследований производилось с периодичностью в шесть секунд, что внесло дополнительную погрешность в оценку времени безопасной эксплуатации пакета;

– значение предельной плотности теплового воздействия для безопасной эксплуатации, полученное в результате экспериментальных исследований, находится в диапазоне $4000 < q_0 < 4500$ Вт/м², что сопоста-

вимо с результатами имитационного моделирования.

На основании полученных в ходе имитационного моделирования испытаний и экспериментальных исследований значений времени безопасной эксплуатации пакета материалов произведена численная оценка параметров модели (3.2). Обработка результатов имитационного моделирования испытаний и экспериментальных исследований производилась с использованием программного пакета статистической обработки данных Statistica for Windows. Численные значения параметров модели (3.2) для различных методов исследования сведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Параметры зависимости (3.2) для различных методов исследования процесса теплопереноса в пакете материалов для боевой одежды пожарных

Метод исследования процесса теплопереноса в пакете материалов БОП	Параметры математической модели (3.2)		Коэффициент детерминации, R^2
	q_0 , Вт/м ²	B , с	
Имитационное моделирование испытаний	4236	179	0,998
Экспериментальные исследования	4226	196	0,998

По результатам комплекса исследований, основанных на моделировании, установлено, что:

– математическая зависимость (3.2) адекватна как результатам имитационного моделирования испытаний, так и экспериментальным данным, что подтверждается значением достоверности модели R^2 ;

– отклонение значений параметров зависимости (3.2) q_0 и B , полученных на основании результатов имитационного моделирования испытаний, от значений, полученных на основании экспериментальных данных, составляет 0,2 % и 8,7 % соответственно.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили высокую эффективность имитационного моделирования как метода исследования теплофизических свойств пакета материалов БОП, который значительно расширяет диапазон получаемых сведений и позволяет более объективно и всесторонне оценить качество пакета. Результаты исследований можно рекомендовать использовать при проведении сравнительного анализа пакетов материалов, планируемых для изготовления боевой одежды пожарных.

3.2.2 Методика оценки показателей, характеризующих теплозащитные свойства боевой одежды пожарных, по результатам кратковременных испытаний на устойчивость к тепловому воздействию

Оценка параметров математической зависимости (3.2) производилась с использованием программного пакета статистической обработки данных Statistica for Windows. Однако довольно часто в лабораторных условиях нет возможности использования средств вычислительной техники и, как следствие, для практического использования предложенной модели возникает необходимость в определении ее параметров по результатам кратковременных испытаний.

1. Определить начальную температуру пакета (t_0) и температуру окружающей среды в испытательной лаборатории (t_c).

2. Определить по справочной литературе значения коэффициента теплопроводности воздуха (λ_{cp}), кинематического коэффициента вязкости воздуха (ν) и числа Прандтля (Pr) по температуре окружающей среды в испытательной лаборатории (t_c), а также степень черноты подкладочной ткани (ε_n).

3. Определить число Грасгофа по формуле

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu^2},$$

где $g = 9,81 \text{ м}^2/\text{с}$; $\beta = \frac{1}{t_c + 273}$, $1/\text{К}$; $\Delta t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $l = 0,01 \text{ м}$.

4. Определить число Нуссельта по формуле

$$Nu = 0,76 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25}.$$

5. Определить для внутренней поверхности пакета конвективную и лучистую составляющие коэффициента теплоотдачи по формулам:

$$\alpha'_k = \frac{Nu \cdot \lambda_{cp}}{l},$$

$$\alpha'_n = \sigma \varepsilon_n \cdot (T^* + T_c) \cdot (T^{*2} + T_c^2),$$

где $T^* = t_0 + 50 + 273$, К ; $T_c = t_c + 273$, К ; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

6. Рассчитать для внутренней поверхности пакета коэффици-

ент теплоотдачи по формуле

$$\alpha_B^* = \alpha'_л + \alpha'_к.$$

7. Рассчитать плотность теплового потока на внутренней поверхности пакета по формуле

$$q_B^* = \alpha_B^* \cdot (T^* - T_c).$$

8. Провести испытания пакета на устойчивость к тепловому воздействию. Образцы пакета материалов размером 210×50 мм подвергнуть воздействию теплового потока плотностью $q_{п} = 3000, 4000, 5000 \text{ Вт/м}^2$. Продолжительность теплового воздействия – до наступления стационарного режима. В процессе проведения испытаний регистрируется значение плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов (q_B).

9. Рассчитать коэффициенты ослабления инфракрасного излучения пакета при различном уровне теплового воздействия по формуле

$$K_{\text{осл}} = \frac{q_{п} - q_B}{q_{п}} \cdot 100\%,$$

и найти его среднеарифметическое значение ($\bar{K}_{\text{осл}}$).

10. Установить предельную плотность теплового воздействия для безопасной эксплуатации пакета по формуле

$$q_0 = \frac{q_B^*}{1 - \left(\frac{\bar{K}_{\text{осл}}}{100} \right)}.$$

11. Провести серию испытаний пакета на устойчивость к тепловому воздействию. Образцы пакета материалов размером 210×50 мм подвергнуть воздействию теплового потока различного уровня в диапазоне

$$q_0 < q_{п} < q_p,$$

где q_p – плотность потока теплового воздействия, действие которого приводит к возникновению видимых признаков деструкции пакета: разрушения наружной поверхности материала верха и внутренних слоев пакета (оплавления, обугливания, прогара); отслоения полимерного покрытия от тканевой основы водонепроницаемого

слоя; воспламенения, Вт/м².

Воздействие теплового потока продолжается до изменения температуры на внутренней поверхности пакета материалов на 50 °С от начального значения температуры пакета. По результатам испытаний определяется время безопасной эксплуатации (τ_i^*).

12. Определить значение параметра B на основе метода наименьших квадратов по формуле

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i^*}{\sum_{i=1}^n C_i},$$

где i – количество уровней теплового воздействия на пакет материалов;

$$C = \ln \frac{q_n}{q_n - q_0}.$$

13. На основании полученных значений показателей теплозащитных свойств построить зависимость времени безопасной эксплуатации пакета материалов БОП от плотности теплового воздействия.

3.2.3 Типовой расчет показателей, характеризующих теплозащитные свойства боевой одежды пожарных, по результатам кратковременных испытаний

Объектом исследования являлся пакет материалов, применяемый при изготовлении БОП в Республике Беларусь и состоящий из *материала верха* – огнезащитная ткань «ЛЕОНИД» (метаарамид – 93 %, параарамид – 5 %, антистатик – 2 %) комбинированного переплетения рип-стоп, в основе и утке которой использовались крученые нити линейной плотности 20 текс × 2 из метаарамидных и параарамидных волокон, ткань с поверхностной плотностью 240 г/м², плотностью по основе 338 нитей на 10 см, а по утку – 246 нитей на 10 см.; *водонепроницаемого слоя* – ткань водупорная «СИСУ» (хлопок 23 %, полиэфир 77 %) полотняного переплетения с полиуретановым покрытием поверхностной плотности 169 г/м²; *теплоизоляционной подстежки* – нетканое холстопршивное полотно (полиэфир – 50 %, арселон – 50 %) с поверхностной плотностью 300 г/м²; *подкладочной ткани* – полиэфирная ткань полотняного переплетения с поверхностной плотностью 80 г/м². Геометрические параметры материалов пакета представлены в таблице 2.2.

1. Начальная температура пакета и температура окружающей

среды в испытательной лаборатории равны:

$$t_0 = t_c = 20 \text{ }^\circ\text{C}.$$

2. По [56, с. 319, таблица П-3] при температуре воздуха в испытательной лаборатории $t_c = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $p = 98,1 \text{ кПа}$ определены коэффициент теплопроводности сухого воздуха: $\lambda_{\text{ср}} = 2,56 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/м}$; кинематический коэффициент вязкости сухого воздуха: $\nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; число Прандтля: $\text{Pr} = 0,703$, $\varepsilon_{\text{п}} = 0,9$.

3. Расчет числа Грасгофа:

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu^2} = \frac{9,81 \cdot 3,413 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 0,01^3}{(15,06 \cdot 10^{-6})^2} = 7381.$$

4. Расчет числа Нуссельта:

$$\text{Nu} = 0,76 \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0,25} = 0,76 \cdot (7381 \cdot 0,703)^{0,25} = 6,45.$$

5. Расчет конвективной и лучистой составляющих коэффициента теплоотдачи для внутренней поверхности пакета:

$$\alpha'_k = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{\text{ср}}}{l} = \frac{6,45 \cdot 2,56 \cdot 10^{-2}}{0,01} = 16,71 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

$$\begin{aligned} \alpha'_{\text{л}} &= \sigma \varepsilon \cdot (T^* + T_c) \cdot (T^{*2} + T_c^2) = \\ &= 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,9 \cdot (343 + 293) \cdot (343^2 + 293^2) = 6,61 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \end{aligned}$$

6. Расчет коэффициента теплоотдачи для внутренней поверхности пакета:

$$\alpha_{\text{в}}^* = \alpha'_{\text{л}} + \alpha'_k = 16,71 + 6,61 = 23,32 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

7. Расчет плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета:

$$q_{\text{в}}^* = \alpha_{\text{в}}^* \cdot (T^* - T_c) = 23,32 \cdot (343 - 293) = 1166 \text{ Вт}/\text{м}^2.$$

8. В результате испытаний пакета на устойчивость при различном уровне теплового воздействия определены численные значения плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета и представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Плотность теплового потока на внутренней поверхности пакета при различном уровне теплового воздействия

Плотность потока теплового воздействия $q_{\text{п}}, \text{Вт/м}^2$	Плотность теплового потока на внутренней поверхности пакета $q_{\text{в}}, \text{Вт/м}^2$
3000	802
4000	1062
5000	1330

9. Расчет коэффициентов ослабления инфракрасного излучения пакета при различном уровне теплового воздействия и его среднеарифметического значения:

$$K_{\text{осл}}(q_{\text{п}} = 3000) = \frac{q_{\text{п}} - q_{\text{в}}}{q_{\text{п}}} \cdot 100\% = \frac{3000 - 802}{3000} \cdot 100\% = 73,3\%;$$

$$K_{\text{осл}}(q_{\text{п}} = 4000) = \frac{q_{\text{п}} - q_{\text{в}}}{q_{\text{п}}} \cdot 100\% = \frac{4000 - 1062}{4000} \cdot 100\% = 73,5\%;$$

$$K_{\text{осл}}(q_{\text{п}} = 5000) = \frac{q_{\text{п}} - q_{\text{в}}}{q_{\text{п}}} \cdot 100\% = \frac{5000 - 1330}{5000} \cdot 100\% = 73,4\%;$$

$$\bar{K}_{\text{осл}} = \frac{73,3 + 73,5 + 73,4}{3} = 73,4\%.$$

10. Расчет предельной плотности теплового воздействия для безопасной эксплуатации пакета:

$$q_0 = \frac{q_{\text{в}}^*}{1 - \left(\frac{\bar{K}_{\text{осл}}}{100} \right)} = \frac{1166}{1 - \left(\frac{73,4}{100} \right)} = 4383 \text{ Вт/м}^2.$$

11. По результатам испытаний пакета на устойчивость при различном уровне теплового воздействия определено время безопасной эксплуатации и представлено в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Время безопасной эксплуатации пакета при различном уровне теплового воздействия

Плотность потока теплового воздействия $q_{\text{п}}, \text{Вт/м}^2$	Время безопасной эксплуатации $\tau^*, \text{с}$
5000	378
6000	240
7000	180

12. Расчет параметра B модели (3.2):

$$C_1 = \ln \frac{q_n}{q_n - q_0} = \ln \frac{5000}{5000 - 4383} = 2,0923;$$

$$C_2 = \ln \frac{q_n}{q_n - q_0} = \ln \frac{6000}{6000 - 4383} = 1,3112;$$

$$C_3 = \ln \frac{q_n}{q_n - q_0} = \ln \frac{7000}{7000 - 4383} = 0,9839;$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i^*}{\sum_{i=1}^n C_i} = \frac{378 + 240 + 180}{2,0923 + 1,3112 + 0,9839} = 182 \text{ с.}$$

13. На основании полученных значений показателей теплозащитных свойств построена зависимость времени безопасной эксплуатации пакета материалов БОП от плотности теплового воздействия (рис. 3.7).

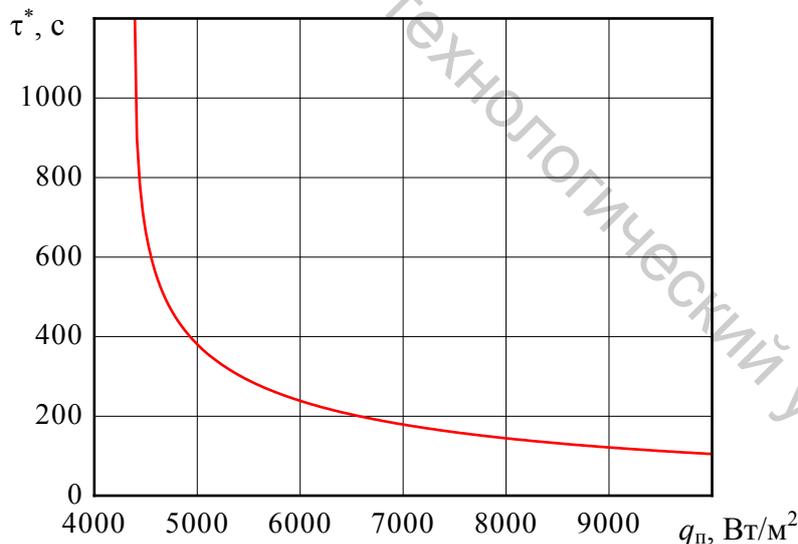


Рисунок 3.7 – Зависимость времени безопасной эксплуатации пакета материалов БОП от плотности теплового воздействия

Для оценки полученных результатов в таблице 3.6 сведены численные значения показателей теплофизических свойств боевой одежды пожарных, полученные по результатам эксперимента и имитационного моделирования.

Таблица 3.6 – Показатели теплозащитных свойств боевой одежды пожарных, полученные в ходе различных методов исследования процесса теплопереноса в пакете материалов

Метод исследования процесса теплопереноса в пакете БОП	Показатели теплозащитных свойств БОП	
	q_0 , Вт/м ²	B , с
Имитационное моделирование испытаний	4236	179
Экспериментальные исследования	4226	196
Методика оценки показателей теплофизических свойств БОП	4383	182

Сравнительный анализ результатов исследований, представленных в таблице 3.6, позволяет отметить, что:

– показатели q_0 и B , определенные по экспресс-методике оценки показателей теплозащитных свойств БОП, адекватны показателям q_0 и B , полученным по результатам эксперимента и имитационного моделирования. Относительная разница между численными значениями q_0 и B , определенных по экспресс-методике и по экспериментальным данным, составляет не более 4 и 8 %, соответственно, а от значений q_0 и B , полученных по результатам имитационного моделирования испытаний – не более 4 и 2 %, соответственно.

3.3 Исследование теплозащитных свойств пакетов материалов для боевой одежды пожарных с различным теплоизоляционным слоем

Разработанная в п. п. 3.2.2 методика позволяет не только определить показатели теплозащитных свойств боевой одежды пожарных, но также оценить степень влияния того или иного материала на теплозащитные свойства всего пакета. Так, с учетом вышеизложенного, было исследовано влияние толщины теплоизоляционного слоя, слоя с наибольшим коэффициентом снижения температуры, на теплозащитные свойства всего пакета.

В качестве объектов исследования использовались два различных пакета материалов, применяемые при изготовлении БОП в Республике Беларусь. Состав пакетов материалов по слоям, а также толщина каждого слоя представлены в таблице 3.7.

По [65, с. 319, таблица П-3] при температуре воздуха в испытательной лаборатории $t_c = 20$ °С и давлении $p = 98,1$ кПа определены коэффициент теплопроводности сухого воздуха: $\lambda_{cp} = 2,56 \cdot 10^{-2}$ Вт/м; кинематический коэффициент вязкости сухого воздуха: $\nu = 15,06 \cdot 10^{-6}$ м²/с; число Прандтля: $Pr = 0,703$; степень черноты подкладочной ткани

$\varepsilon_{\text{п}} = 0,9$. Начальная температура материалов пакета № 1, 2 равна $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таблица 3.7 – Состав пакетов материалов № 1, 2 и толщина материалов

Наименование слоя	Наименование материалов пакета		Толщина, м	
	Пакет № 1	Пакет № 2	№ 1	№ 2
Материал верха	Огнезащитная ткань (метаарамид – 93 %, параарамид – 5 %, антистатик – 2 %), комбинированного переплетения, в основе и утке которой использовались круче-ные нити $T = 20 \text{ текс} \times 2$, $M_2 = 240 \text{ г/м}^2$, $P_0 = 338$ нитей на 10 см, $P_y = 246$ нитей на 10 см		0,00055	
Водонепроница-емый слой	Ткань водупорная (хлопок – 23 %, полиэфир – 77 %) с полиуретановым покрытием, полотняного перепле-тения, $M_2 = 169 \text{ г/м}^2$		0,00024	
Теплоизоляци-онная подкладка	Нетканое иглопро-шивное полотно (по-лиэфир 50 %, арселон 50 %), $M_2 = 300 \text{ г/м}^2$	Нетканое иглопрошивное полотно, $M_2 = 300 \text{ г/м}^2$	0,0044	0,0044
		Ватин полшерстяной хол-стопрошивной, $M_2 = 235 \text{ г/м}^2$		0,0039
Подкладочная ткань	Полиэфир 100 %, полотняного переплетения, $M_2 = 80 \text{ г/м}^2$		0,0001	

Расчеты плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов при предельном тепловом воздействии для исследу-емых пакетов № 1, 2 представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Результаты расчета теплового потока на внутренней поверхности пакетов материалов № 1, 2 при предельном тепловом воздействии

Наименование показателя	Пакет № 1, 2
Число Грасгофа Gr	7381
Число Нуссельта Nu	6,45
Конвективная составляющая коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности пакета $\alpha'_{\text{к}}$, Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)	16,71
Лучистая составляющая коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности пакета $\alpha'_{\text{л}}$, Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)	6,61
Коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности пакета $\alpha_{\text{в}}$, Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)	23,32
Плотность теплового потока на внутренней поверхности пакета $q^*_{\text{в}}$, Вт/ м^2	1166

В результате испытаний пакетов № 1, 2 на устойчивость при раз-личном уровне теплового воздействия определены численные значения плотности теплового потока на внутренней поверхности пакетов и представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Плотность теплового потока на внутренней поверхности пакетов № 1, 2 при различном уровне теплового воздействия

Плотность потока теплового воздействия $q_{\text{п}}, \text{Вт/м}^2$	Плотность теплового потока на внутренней поверхности $q_{\text{в}}, \text{Вт/м}^2$	
	Пакет № 1	Пакет № 2
3000	802	619
4000	1062	828
5000	1330	1043

На основании результатов, представленных в таблице 3.9, определены коэффициенты ослабления инфракрасного излучения при различном уровне теплового воздействия и их среднеарифметические значения:

– для пакета № 1

$$K_{\text{осл}}(q_{\text{п}} = 3000) = \frac{q_{\text{п}} - q_{\text{в}}}{q_{\text{п}}} \cdot 100\% = \frac{3000 - 802}{3000} \cdot 100\% = 73,3\%;$$

$$K_{\text{осл}}(q_{\text{п}} = 4000) = \frac{q_{\text{п}} - q_{\text{в}}}{q_{\text{п}}} \cdot 100\% = \frac{4000 - 1062}{4000} \cdot 100\% = 73,5\%;$$

$$K_{\text{осл}}(q_{\text{п}} = 5000) = \frac{q_{\text{п}} - q_{\text{в}}}{q_{\text{п}}} \cdot 100\% = \frac{5000 - 1330}{5000} \cdot 100\% = 73,4\%;$$

$$\bar{K}_{\text{осл}} = \frac{73,3 + 73,5 + 73,4}{3} = 73,4\%;$$

– для пакета № 2

$$K_{\text{осл}}(q_{\text{п}} = 3000) = \frac{q_{\text{п}} - q_{\text{в}}}{q_{\text{п}}} \cdot 100\% = \frac{3000 - 619}{3000} \cdot 100\% = 79,4\%$$

$$K_{\text{осл}}(q_{\text{п}} = 4000) = \frac{q_{\text{п}} - q_{\text{в}}}{q_{\text{п}}} \cdot 100\% = \frac{4000 - 828}{4000} \cdot 100\% = 79,3\%;$$

$$K_{\text{осл}}(q_{\text{п}} = 5000) = \frac{q_{\text{п}} - q_{\text{в}}}{q_{\text{п}}} \cdot 100\% = \frac{5000 - 1043}{5000} \cdot 100\% = 79,1\%;$$

$$\bar{K}_{\text{осл}} = \frac{79,4 + 79,3 + 79,1}{3} = 79,3\%.$$

С учетом полученных коэффициентов ослабления инфракрасного излучения пакетов определена предельная плотность теплового воздействия для безопасной эксплуатации:

– для пакета № 1

$$q_0 = \frac{q_B^*}{1 - \left(\frac{\bar{K}_{\text{осл}}}{100} \right)} = \frac{1166}{1 - \left(\frac{73,4}{100} \right)} = 4383 \text{ Вт/м}^2;$$

– для пакета № 2

$$q_0 = \frac{q_B^*}{1 - \left(\frac{\bar{K}_{\text{осл}}}{100} \right)} = \frac{1166}{1 - \left(\frac{79,3}{100} \right)} = 5633 \text{ Вт/м}^2.$$

По результатам испытаний пакета на устойчивость при различном уровне теплового воздействия определено время безопасной эксплуатации пакета № 1, 2 и представлено в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Время безопасной эксплуатации пакетов № 1, 2 при различном уровне теплового воздействия

Плотность потока теплового воздействия q_n , Вт/м ²	Время безопасной эксплуатации τ^* , с	
	Пакет № 1	Пакет № 2
5000	378	–
6000	240	475
7000	180	278
8000	–	206

С учетом предельной плотности теплового воздействия для безопасной эксплуатации определен параметр B модели (3.2):

– для пакета № 1

$$C_1 = \ln \frac{q_n}{q_n - q_0} = \ln \frac{5000}{5000 - 4383} = 2,0923;$$

$$C_2 = \ln \frac{q_n}{q_n - q_0} = \ln \frac{6000}{6000 - 4383} = 1,3112;$$

$$C_3 = \ln \frac{q_n}{q_n - q_0} = \ln \frac{7000}{7000 - 4383} = 0,9839;$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i^*}{\sum_{i=1}^n C_i} = \frac{378 + 240 + 180}{2,0923 + 1,3112 + 0,9839} = 182 \text{ с};$$

– для пакета № 2

$$C_1 = \ln \frac{q_n}{q_n - q_0} = \ln \frac{6000}{6000 - 5633} = 2,7942;$$

$$C_2 = \ln \frac{q_n}{q_n - q_0} = \ln \frac{7000}{7000 - 5633} = 1,6333;$$

$$C_3 = \ln \frac{q_n}{q_n - q_0} = \ln \frac{8000}{8000 - 5633} = 1,2178;$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i^*}{\sum_{i=1}^n C_i} = \frac{475 + 278 + 206}{2,7942 + 1,6333 + 1,2178} = 170 \text{ с}.$$

На основании численных значений показателей теплозащитных свойств пакетов № 1, 2 построены зависимости времени безопасной эксплуатации от плотности теплового воздействия и представлены на рисунке 3.7.

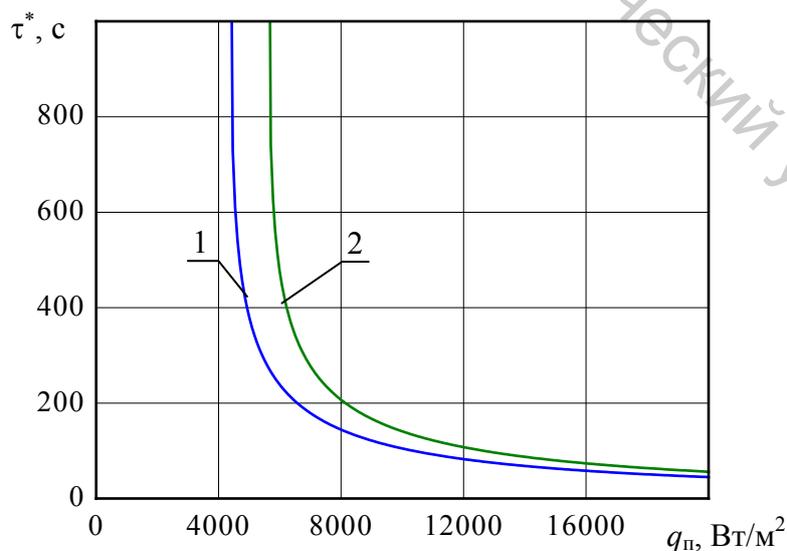


Рисунок 3.7 – Зависимости времени безопасной эксплуатации от плотности теплового воздействия для пакетов № 1, 2:

1 – $q_0 = 4383 \text{ Вт/м}^2$, $B = 182 \text{ с}$; 2 – $q_0 = 5633 \text{ Вт/м}^2$, $B = 170 \text{ с}$

В результате проведенных исследований установлено, что:

– увеличение толщины теплоизоляционного слоя приводит к улучшению теплозащитных свойств пакета материалов боевой одежды пожарных. Коэффициент ослабления инфракрасного излучения пакета с двойным теплоизоляционным слоем выше на 5,9 % по сравнению с пакетом, состоящим из одного теплоизоляционного слоя;

– пакет материалов с двойным теплоизоляционным слоем имеет большую предельную плотность теплового воздействия для безопасной эксплуатации более чем на 1200 Вт/м² по сравнению с пакетом, состоящим из одного теплоизоляционного слоя;

– увеличение толщины теплоизоляционного слоя пакета материалов практически в два раза приводит к увеличению предельной плотности теплового воздействия для безопасной эксплуатации не более чем на 28,5 %.

РЕЗЮМЕ

1. Введены и обоснованы показатели, характеризующие теплозащитные свойства пакета материалов боевой одежды пожарных, что позволило повысить информативность нормативных испытаний и совершенствовать систему оценки технического состояния боевой одежды пожарных, а также установлены закономерности влияния плотности теплового воздействия на время ее безопасной эксплуатации (время достижения предельно допустимой температуры на внутренней поверхности пакета).

2. В результате моделирования процесса теплопереноса в пакете материалов для боевой одежды пожарных установлено, что численное значение теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов q_v не превышает нормативного значения, следовательно время безопасной эксплуатации пакета материалов определяется температурой на внутренней поверхности. Значения максимальной температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов при неограниченном времени испытания не превышают нормативных значений по результатам имитационного моделирования при плотности теплового воздействия не более 4200 Вт/м^2 , а по данным эксперимента – при плотности теплового воздействия до 4500 Вт/м^2 .

3. Установлено, что математическая зависимость времени безопасной эксплуатации боевой одежды пожарных от плотности теплового воздействия адекватна как результатам имитационного моделирования испытаний, так и экспериментальным данным. Для практического использования данной математической модели разработана методика оценки ее показателей по результатам кратковременных испытаний на устойчивость к тепловому воздействию пакета материалов.

4. В результате оценки и сравнительного анализа теплофизических показателей пакетов материалов боевой одежды пожарных с различной толщиной теплоизоляционного слоя показано, что увеличение толщины теплоизоляционного слоя практически в два раза приводит к увеличению предельной плотности теплового воздействия для безопасной эксплуатации не более чем на 28,5 %.

ГЛАВА 4

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПАКЕТА МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ БОЕВОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ В ПРОЦЕССЕ МНОГОЦИКЛОВОГО ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Боевая одежда пожарных предназначена для обеспечения безопасных условий работы пожарных. Она является непосредственным препятствием между человеком и опасными факторами пожара. К ней предъявляются высокие требования по показателям защиты, эргономики, гигиены, уровню адаптации и т. д. Это касается как конструктивного исполнения, так и используемых для ее изготовления материалов.

Анализ нормативных требований к пакету материалов, используемых для изготовления БОП, позволяет отметить, что оценка показателей теплофизических свойств производится при одноцикловом тепловом воздействии. Однако в процессе эксплуатации БОП фактически сталкивается с многократно повторяющейся нагрузкой: тепловые и механические воздействия, действие воды и агрессивных сред, климатические воздействия и др. Таким образом, нормативные теплофизические показатели пакета материалов БОП служат только мерой качества изготовления и не могут быть использованы для оценки эксплуатационных свойств.

Целью исследований, проводимых в данной главе, является изучение влияния многоциклового теплового воздействия на показатели теплофизических свойств пакета материалов боевой одежды пожарных, что позволит оценить не только качество изготовления, но и резервы эксплуатационной надежности материалов.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие основные задачи:

- теоретическое обоснование закономерностей изменения показателей теплофизических свойств пакета материалов боевой одежды пожарных в процессе многоциклового теплового воздействия с разработкой соответствующих математических моделей;

- проверка адекватности разработанных математических моделей результатам эксперимента и анализ возможности прогнозирования показателей теплофизических свойств пакета материалов боевой одежды пожарных в процессе многоциклового теплового воздействия.

4.1 Теоретический анализ закономерностей изменения показателей теплофизических свойств пакета материалов боевой одежды пожарных в процессе многоциклового теплового воздействия

В процессе эксплуатации боевая одежда пожарных подвергается многократному воздействию высоких температур до 300 °С. Это приводит к протеканию процессов старения и изменению свойств волокон вследствие структурных перестроек и деструктивных явлений, а соответственно изменению свойств материалов пакета защитной одежды во времени, что изучено совершенно недостаточно. До сих пор данные по испытаниям этих материалов в условиях теплового воздействия, носящего цикловой характер отсутствуют. Анализ литературных источников показывает, что опубликованные сведения содержат в основном данные о кратковременных и длительных термических воздействиях на свойства термо- и огнестойких нитей. При этом большинство имеющихся сведений касаются только изменения физико-механических свойств [47, 48, 131–136]. При всей актуальности и востребованности сведений об эксплуатационных характеристиках материалов, используемых для изготовления боевой одежды пожарных, до настоящего времени не проводилось системных исследований их надежности при многоцикловом тепловом воздействии.

Согласно [5] количественными критериями оценки результатов испытания на устойчивость пакета к тепловому воздействию являются температура и плотность теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов в течение испытания. Поэтому наиболее удобно процесс изменения теплофизических свойств пакета при эксплуатации описывать графически, при помощи кривых зависимостей максимальной температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета от числа циклов теплового воздействия с разработкой соответствующих математических моделей.

Следует отметить, что исследование закономерностей изменения показателей теплофизических свойств пакета материалов боевой одежды пожарных при циклическом тепловом нагружении может позволить разработать научные основы для осуществления экспресс-оценки безопасного срока службы боевой одежды пожарных при эксплуатации на основе применения параметрического принципа оценки качества сложных технических систем.

4.1.1 Разработка вероятностных математических моделей изменения показателей теплофизических свойств пакета материалов боевой одежды пожарных в процессе многоциклового теплового воздействия

Модель эксперимента (испытания), при котором определяется либо число определенных событий, которые имеют место в течение определенного периода времени τ , либо изменение состояния наблюдаемого объекта, по определению является процессом Пуассона [137, 138]. Состояние объекта при этом может изменяться дискретно или непрерывно.

Событием может считаться разрушение какого-либо элемента функционирующей системы, состоящей из b параллельных звеньев. После отказа одного звена его функция и нагрузка перераспределяется между оставшимися элементами системы.

Стационарным процесс Пуассона может быть при условии, что вероятность появления одного события на достаточно малом интервале времени $\Delta\tau$ пропорциональна продолжительности этого интервала, и не зависит от расположения интервала на оси времени:

$$P_1(\Delta\tau) = k \cdot \Delta\tau,$$

где $P_1(\Delta\tau)$ – вероятность появления одного события за время $\Delta\tau$; k – коэффициент пропорциональности.

Кроме того, вероятность появления двух и более событий за время $\Delta\tau$ пренебрежительно мала, а число событий зависит только от продолжительности этого интервала, и не зависит от его положения. Тогда

$$P_0(\tau) = \exp(-k \cdot \tau); P_1(\tau) = (k \cdot \tau) \cdot \exp(-k \cdot \tau); P_j(\tau) = \frac{(k \cdot \tau)^j}{j!} \exp(-k \cdot \tau),$$

где $P_j(\tau)$ – вероятность того, что за время τ произойдет j событий.

Таким образом, в случае стационарности процесса Пуассона функцию распределения $F(\tau)$ можно представить:

$$F(\tau) = 1 - P_0(\tau) = 1 - \exp(-k \cdot \tau).$$

Нестационарным процесс Пуассона будет при условии, если вероятность появления одного события в интервале $(\tau, \tau + \Delta\tau)$ будет зависеть от выбора расположения интервала на оси времени и определяться уравнением:

$$P_1(\tau, \tau + \Delta\tau) = \frac{d}{b} \cdot \left(\frac{\tau}{b}\right)^{d-1},$$

а при $d = 1$, процесс Пуассона – стационарный. Тогда

$$P_0(\tau) = \exp\left[-\left(\frac{\tau}{b}\right)^d\right]; P_1(\tau) = \left(\frac{\tau}{b}\right)^d \cdot \exp\left[-\left(\frac{\tau}{b}\right)^d\right];$$

$$P_j(\tau) = \frac{\left(\frac{\tau}{b}\right)^{d \cdot j}}{j!} \exp\left[-\left(\frac{\tau}{b}\right)^d\right].$$

А вероятность того, что одно событие произойдет до времени τ , определяет интегральная функция распределения нестационарного процесса Пуассона, имеющая следующий вид:

$$F(\tau) = 1 - P_0(\tau) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\tau}{b}\right)^d\right]. \quad (4.1)$$

Предположив, что процесс изменения показателей теплофизических свойств пакета материалов при многократной тепловой нагрузке идентичен нестационарному процессу накопления уровня повреждений в процессе Пуассона, то применительно к максимальной температуре на внутренней поверхности пакета по аналогии с соотношением (4.1) можно записать [139, 140]:

$$\frac{t^*(\tau) - t_0^*}{t_p^* - t_0^*} = F(\tau) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\tau}{b}\right)^d\right], \quad (4.2)$$

или учитывая, что время пропорционально числу циклов теплового воздействия, минимальное количество которых равно 1, то модель (4.2) можно представить в следующем виде:

$$\frac{t^*(n) - t_1^*}{t_p^* - t_1^*} = F(n) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{n-1}{b}\right)^d\right], \quad (4.3)$$

где $t^*(n)$ – текущее значение максимальной температуры на внутренней поверхности пакета на n -ном цикле теплового воздействия, °C; t_p^* – значение максимальной температуры на внутренней поверхности пакета, соответствующее состоянию пакета, при котором температура на

внутренней поверхности пакета остается постоянной и не зависит от количества циклов теплового воздействия, °C; t_1^* – максимальная температура на внутренней поверхности пакета материалов на первом цикле теплового нагружения образца, °C; $n = 1, 2, 3, \dots$ – количество циклов теплового воздействия, цикл.

Схематичное представление зависимости максимальной температуры на внутренней поверхности пакета от количества циклов теплового воздействия и порядок ее формирования на основании зависимости температуры на внутренней поверхности пакета материалов от времени при многоцикловом воздействии изображено на рисунке 4.1.

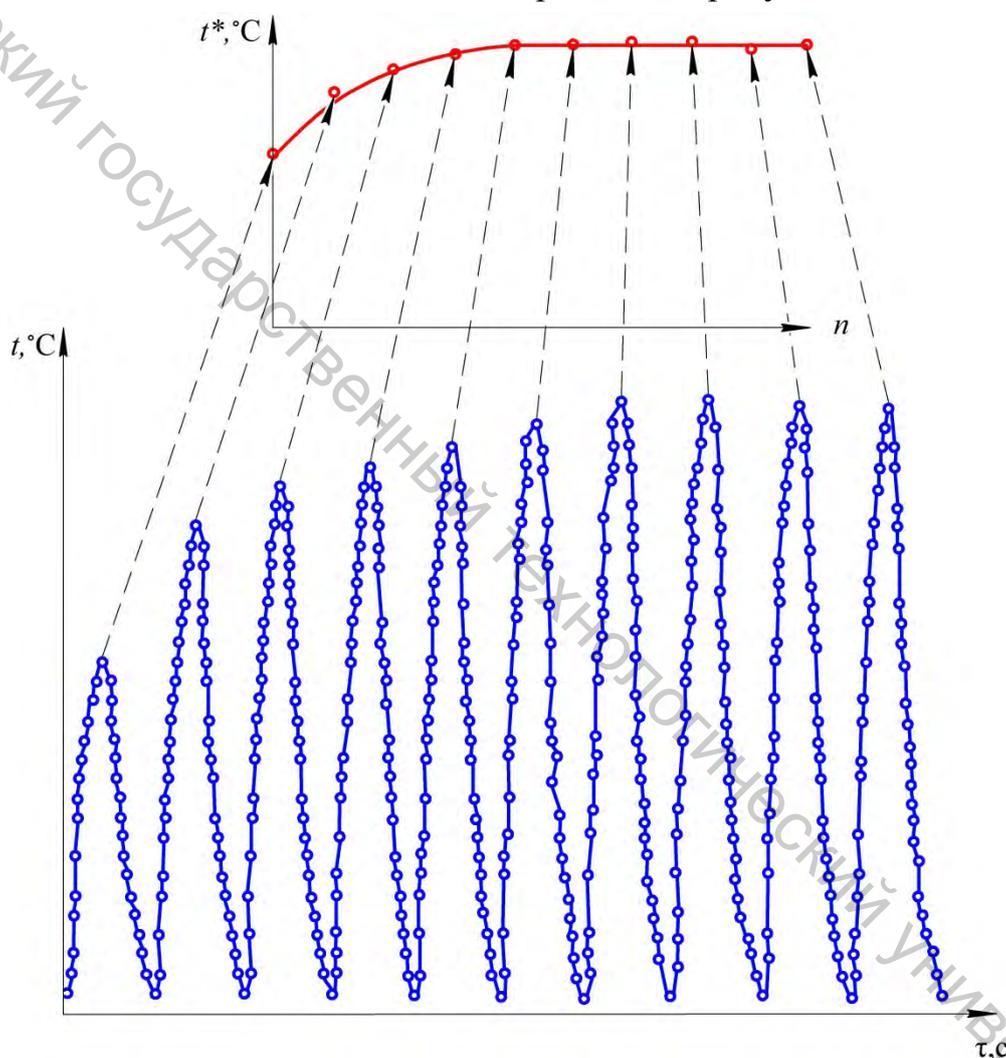


Рисунок 4.1 – Порядок формирования и схематичное представление зависимости максимальной температуры на внутренней поверхности пакета от количества циклов теплового воздействия

$F(n)$ – интегральная функция распределения, характеризующая вероятность того, что максимальная температура на внутренней поверхности пакета достигнет критического значения до совершения n числа циклов теплового воздействия.

Введя обозначение:

$$\frac{1}{b^d} = M^d,$$

математическую модель (4.3) удобно представить в виде:

$$\frac{t^*(n) - t_1^*}{t_p^* - t_1^*} = 1 - \exp[-M^d(n-1)^d],$$

или

$$t^*(n) = t_p^* - (t_p^* - t_1^*) \cdot \exp[-M^d(n-1)^d]. \quad (4.4)$$

Для определения физического смысла параметра M выражение (4.4) было приведено к виду:

$$\frac{t_p^* - t^*(n)}{t_p^* - t_1^*} = \exp[-M^d(n-1)^d].$$

Если $M = \frac{1}{(n'-1)}$, то:

$$\frac{t_p^* - t^*(n)}{t_p^* - t_1^*} = \exp(-1).$$

Следовательно, параметр M модели (4.4) имеет размерность [цикл⁻¹] и определяет количество циклов теплового нагружения $(n'-1)$, по истечении которых текущее изменение максимальной температуры на внутренней поверхности пакета $t^*(n)$ по отношению к критическому значению максимальной температуры на внутренней поверхности пакета t_p^* меньше предельно возможного значения в e раз.

Очевидно, что при $n = 1$ значение $t^*(n) = t_1^*$, а при $n \rightarrow \infty$, $t^*(n) = t_p^*$.

Использование математической модели (4.4) позволяет провести анализ интенсивности процесса изменения максимальной температуры на внутренней поверхности пакета при испытании на многократное тепловое воздействие:

$$I_{t^*}(n) = \frac{dt^*(n)}{dn} = d \cdot M^d \cdot (n-1)^{d-1} \cdot (t_p^* - t_1^*) \cdot \exp[-M^d(n-1)^d], \quad (4.5)$$

где $I_q^*(n)$ – интенсивность процесса изменения максимальной температуры на внутренней поверхности пакета, °С/цикл.

Предположив, что процесс изменения плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов при многократной тепловой нагрузке идентичен процессу изменения максимальной температуры на внутренней поверхности пакета при той же тепловой нагрузке, то по аналогии с соотношениями (4.4) и (4.5) можно записать:

$$q^*(n) = q_p^* - (q_p^* - q_1^*) \cdot \exp[-N^h(n-1)^h], \quad (4.6)$$

$$I_q^*(n) = \frac{dq^*(n)}{dn} = h \cdot N^h \cdot (n-1)^{h-1} \cdot (q_p^* - q_1^*) \cdot \exp[-N^h(n-1)^h], \quad (4.7)$$

где $q^*(n)$ – текущее значение максимальной плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета на n -ном цикле теплового воздействия, Вт/м²; q_p^* – значение максимальной плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета, соответствующее состоянию пакета, при котором плотность теплового потока на внутренней поверхности пакета остается постоянной и не зависит от количества циклов теплового воздействия, Вт/м²; q_1^* – максимальная плотность теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов на первом цикле теплового нагружения образца, Вт/м²; N – темповый параметр модели, определяющий количество циклов теплового нагружения n , по истечении которых текущее изменение максимальной плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета $q^*(n)$ по отношению к критическому значению максимальной температуры на внутренней поверхности пакета q_p^* меньше предельно возможного значения в e раз, цикл⁻¹; $I_q^*(n)$ – интенсивность процесса изменения максимальной плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета, Вт/(м²·цикл).

Таким образом, на основании анализа процесса изменения показателей теплофизических свойств пакета материалов при многократной тепловой нагрузке и интерпретации этих результатов с вероятностной точки зрения, разработаны математические модели взаимосвязи максимальной температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета, а также интенсивности процесса изменения максимальной температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета от количества циклов теплового воздействия. Применение данных моделей позволит осуществлять прогноз показателей теплофизических свойств пакета материалов при проведении испытаний на устойчивость к многократному тепловому воздействию.

4.1.2 Разработка математических моделей изменения показателей теплофизических свойств пакета материалов боевой одежды пожарных в процессе многоциклового теплового воздействия с использованием основного принципа теории надёжности профессора Н. М. Седякина

Другим подходом для теоретической интерпретации изменения показателей теплофизических свойств пакета материалов боевой одежды пожарных в процессе многоциклового теплового воздействия является применение основного физического принципа теории надёжности, впервые сформулированного профессором Н. М. Седякиным [141–143].

Применительно к процессу роста максимальной температуры на внутренней поверхности пакета материалов при многократном тепловом воздействии основной физической принцип теории надёжности можно сформулировать следующим образом [139, 140]:

«Скорость изменения максимальной температуры на внутренней поверхности пакета материалов dt^/dn не зависит от того, как и за какое время (количество циклов теплового нагружения) она изменилась от некоторого начального значения t_1^* до текущего t^* в рассматриваемый момент времени, а зависит от условий проведения испытания и теплофизических свойств материалов».*

Запись этого принципа в дифференциальной форме имеет следующий вид:

$$\frac{dt^*}{dn} = -M(t^* - t_p^*)^p, \quad (4.8)$$

где M – параметр модели, отражающий темп изменения показателя теплофизических свойств; p – параметр модели, принимающий значение 1, 2, ...

Решение дифференциального уравнения (4.8) при условии $p = 1$ имеет следующий вид:

$$\int_{t_1^*}^{t^*} \frac{dt^*}{(t^* - t_p^*)} = -M \int_1^n dn \Rightarrow \ln \left| \frac{t^* - t_p^*}{t_1^* - t_p^*} \right| = -M \cdot (n - 1),$$
$$t^*(n) = t_p^* - (t_p^* - t_1^*) \cdot \exp[-M(n - 1)]. \quad (4.9)$$

Очевидно, что при $n = 1$ значение $t^*(n) = t_1^*$, а при $n \rightarrow \infty$, $t^*(n) = t_p^*$.

Параметр M модели (4.9) имеет смысл аналогичный соответствующему параметру модели (4.4) при условии, что $d = 1$. Следовательно, темповой параметр M модели (4.9) имеет размерность [цикл⁻¹] и является величиной обратной количеству циклов теплового нагружения $(n' - 1)$, необходимых для выполнения следующего условия:

$$\frac{t_p^* - t^*(n')}{t_p^* - t_1^*} = \exp(-1).$$

Использование математической модели (4.9) позволяет провести анализ интенсивности процесса изменения максимальной температуры на внутренней поверхности пакета при испытании на многократное тепловое воздействие:

$$I_{t^*}(n) = \frac{dt^*(n)}{dn} = M \cdot (t_p^* - t_1^*) \cdot \exp[-M(n-1)], \quad (4.10)$$

Предположив, что процесс изменения плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов при многократной тепловой нагрузке идентичен процессу изменения максимальной температуры на внутренней поверхности пакета при той же тепловой нагрузке, то по аналогии с соотношениями (4.9) и (4.10) можно записать:

$$q^*(n) = q_p^* - (q_p^* - q_1^*) \cdot \exp[-N(n-1)], \quad (4.11)$$

$$I_{q^*}(n) = \frac{dq^*(n)}{dn} = N \cdot (q_p^* - q_1^*) \cdot \exp[-N(n-1)], \quad (4.12)$$

Необходимо отметить ограниченное применение математических моделей, полученных при $p \geq 2$, что подробно обосновано в работе [141]. Вследствие этого примеры реализации принципа (4.8) при $p \geq 2$ в данной работе не рассматривались.

Таким образом, в результате теоретического анализа процесса изменения показателей теплофизических свойств пакета материалов при многократной тепловой нагрузке разработаны математические модели взаимосвязи максимальной температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета и количества циклов теплового воздействия. Можно отметить идентичный вид математических моделей (4.4), (4.6) и (4.9), (4.11), полученных различными способами, что свидетельствует о правомерности выдвинутых при этом гипотез и предположений.

4.2 Экспериментальные исследования закономерностей изменения показателей теплофизических свойств пакета материалов боевой одежды пожарных в процессе испытания на устойчивость к многократному тепловому воздействию

Для оценки адекватности результатам эксперимента полученных математических моделей изменения показателей теплофизических свойств пакета материалов БОП при многократном тепловом воздействии на базе научно-исследовательского центра Витебского областного управления МЧС проведен ряд исследований.

В качестве объекта исследования использовался пакет материалов, применяемый при изготовлении БОП в Республике Беларусь и состоящий из *материала верха* – ткань саржевого переплетения, в основе и утке которых использовались крученые нити линейной плотности 29 текс \times 2 из термостойкого синтетического волокна «Арселон-С», ткань с поверхностной плотностью 260 г/м², плотностью по основе 264 нитей на 10 см, а по утку – 165 нитей на 10 см; *водонепроницаемого слоя* – нетканое иглопробивное полотно с поверхностной плотностью 220 г/м² с водонепроницаемой пленкой ТУ ВУ 300620644.017-2008; *теплоизоляционной подстежки* – ватин полушерстяной холстопршивной, поверхностная плотность 235 г/м²; *подкладочной ткани* – 100 % хлопчатобумажная ткань полотняного переплетения, поверхностная плотность 140 г/м².

Для исследований было отобрано пять проб пакета материалов размером 210 \times 70 мм. Перед испытаниями пробы материалов были выдержаны в климатических условиях по ГОСТ 10681 и тщательно визуально осмотрены для выявления видимых дефектов, комплектности, состояния поверхностей.

При проведении экспериментальных исследований применялось испытательное оборудование и средства измерений, приведенные в таблице 2.1. Испытания проводились при воздействии теплового потока в диапазоне от 2000 Вт/ м² до 5000 Вт/ м², действие которых гарантированно не приводит к возникновению видимых признаков деструкции пакета: разрушения наружной поверхности материала верха и внутренних слоев пакета (оплавления, обугливания, прогара); отслоения полимерного покрытия от тканевой основы водонепроницаемого слоя; воспламенения. Количество циклов воздействия теплового потока ограничивалось десятью циклами нагрева-охлаждения пакета материалов.

Методика проведения испытаний на устойчивость пакета к многократному тепловому воздействию соответствует нормативным испытаниям на устойчивость к воздействию теплового потока пакета материалов [5, с. 12, приложение А] с некоторыми дополнениями и состоит из следующей последовательности шагов:

1. Подключают радиационную панель и систему охлаждения установки по определению устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов, а также регистрирующие приборы к источникам электропитания и водоснабжения, соответственно.

2. Радиационную панель прогревают в течение (25 ± 5) мин от начала подключения к источнику электропитания.

3. Поднимают защитную заслонку радиационной панели, открывая доступ теплового потока к датчику для измерения плотности теплового потока.

4. Изменяя расстояние между радиационной панелью и датчиком для измерения теплового потока, устанавливают держатель образца на таком расстоянии, при котором значение плотности теплового потока, попадающего на образец, равно требуемому значению.

5. Опускают заслонку и фиксируют расстояние от радиационной панели до держателя образца.

6. Устанавливают пакет материалов на держателе с помощью зажимов и устройства натяжения.

7. Регистрируют начальное значение температуры на внутренней поверхности пакета.

8. Поднимают защитную заслонку радиационной панели и выдерживают пакет материалов под действием теплового потока установленной плотности в течение 240 секунд.

9. По истечении времени теплового воздействия защитную заслонку радиационной панели опускают. Охлаждение пакета продолжается до достижения начальной температуры на внутренней поверхности пакета.

10. В течение всего цикла нагрева-охлаждения измеряют плотность теплового потока, прошедшего через пакет, и температуру на внутренней поверхности пакета.

11. После завершения этапа охлаждения пакет подвергается повторному воздействию установленного теплового потока. Повторяются шаги 8–10.

12. После окончания десятого цикла нагрева-охлаждения образец изымается из держателя. Далее для другого значения плотности теплового потока повторяются шаги 3–11.

На основании полученных результатов исследования строятся зависимости изменения плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета, а так же температуры на внутренней поверхности пакета от времени.

В результате экспериментальных исследований получены зависимости изменения теплового потока и температуры на внутренней поверхности пакета материалов в процессе десяти циклового (нагрев-охлаждение) теплового нагружения для различной плотности падающего теплового потока [144–146]. Некоторые результаты исследований

представлены на рисунках 4.2–4.9.

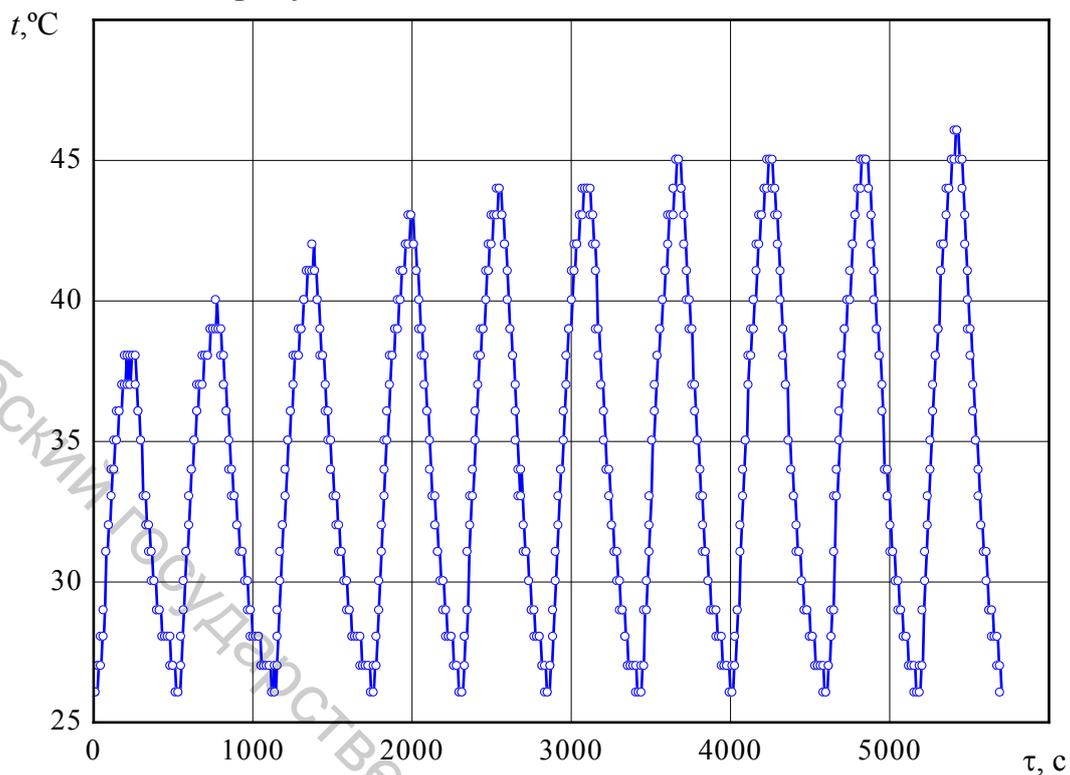


Рисунок 4.2 – Экспериментальные зависимости температуры на внутренней поверхности пакета материалов от времени при 10-цикловом воздействии теплого потока плотностью $q_{\text{п}} = 2000 \text{ Вт/м}^2$

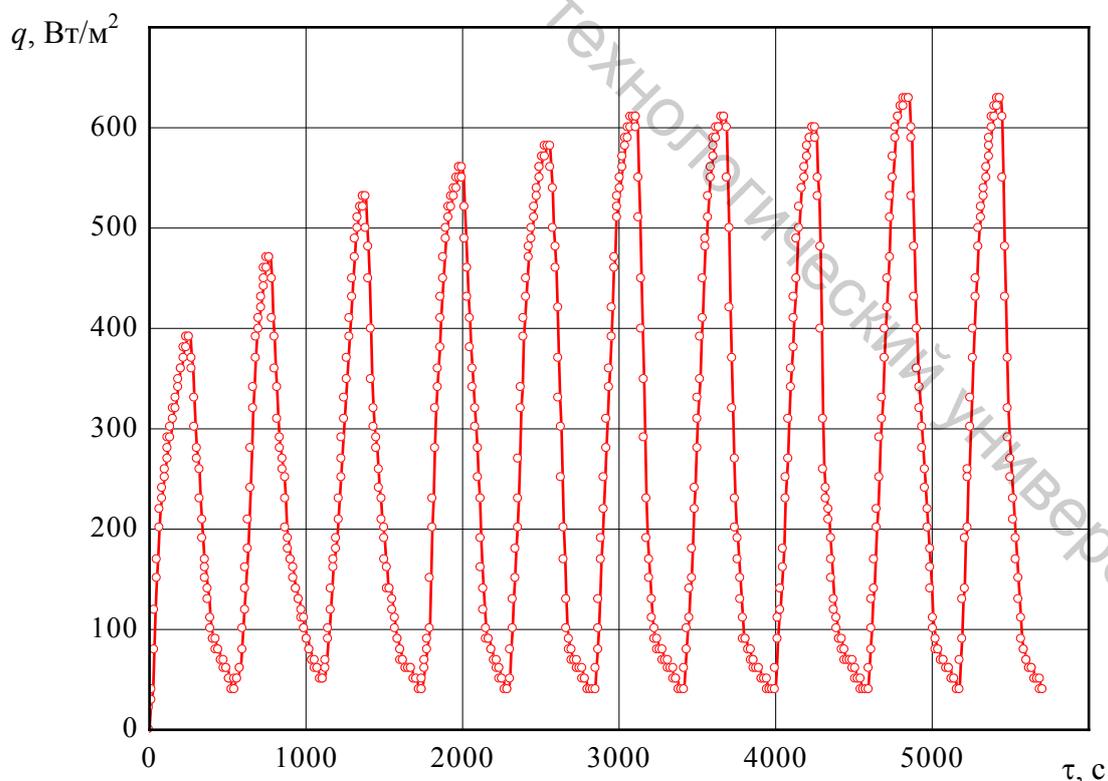


Рисунок 4.3 – Экспериментальные зависимости плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов от времени при 10-цикловом воздействии теплого потока плотностью $q_{\text{п}} = 2000 \text{ Вт/м}^2$

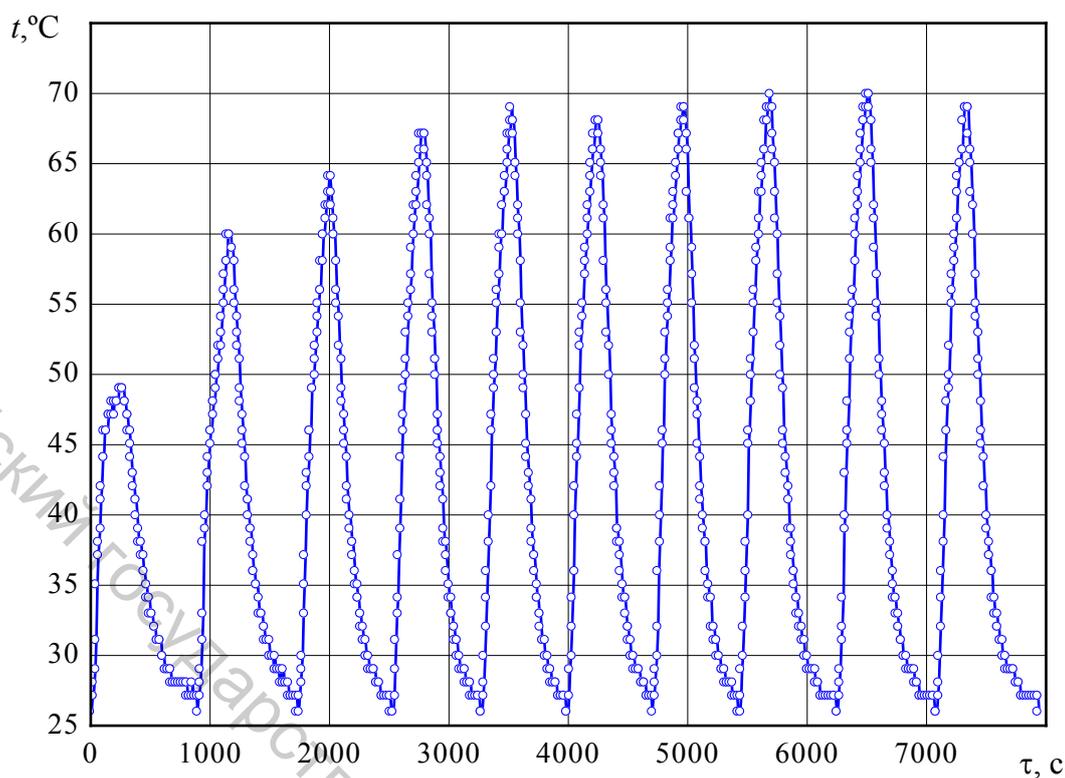


Рисунок 4.4 – Экспериментальные зависимости температуры на внутренней поверхности пакета материалов от времени при 10-цикловом воздействии теплового потока плотностью $q_{п} = 4000 \text{ Вт/м}^2$

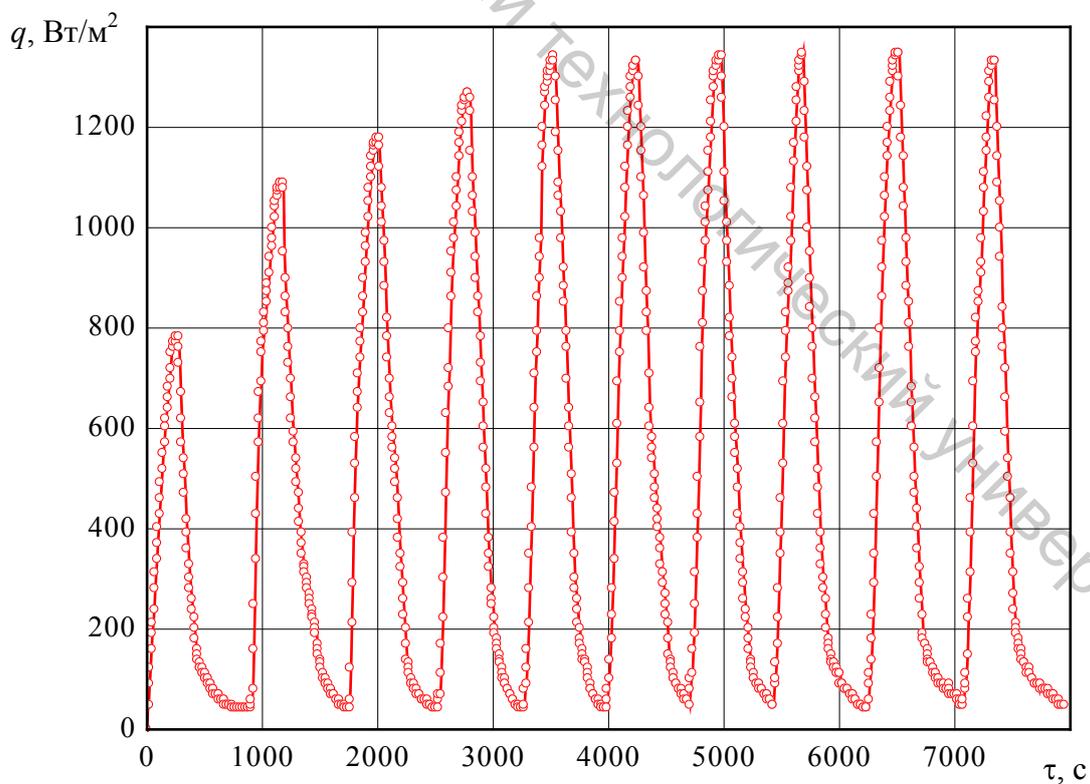


Рисунок 4.5 – Экспериментальные зависимости плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов от времени при 10-цикловом воздействии теплового потока плотностью $q_{п} = 4000 \text{ Вт/м}^2$

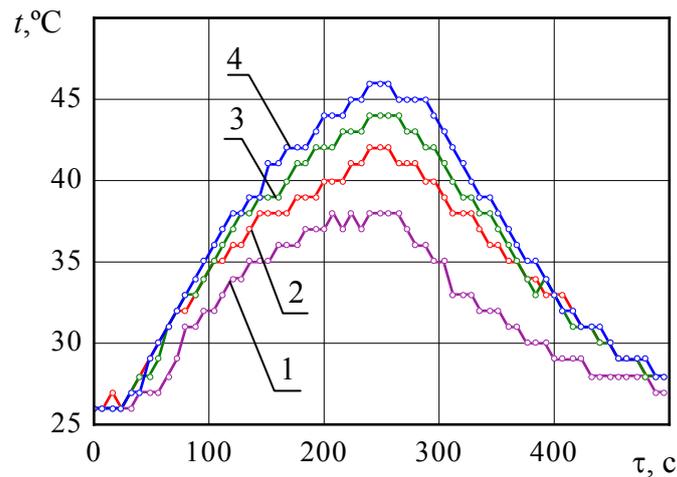


Рисунок 4.6 – Совмещенные экспериментальные зависимости температуры на внутренней поверхности пакета материалов от времени для различных циклов теплового нагружения при плотности теплового воздействия $q_n = 2000 \text{ Вт/м}^2$:

1 – 1 цикл; 2 – 3 цикл;
3 – 5 цикл; 4 – 10 цикл

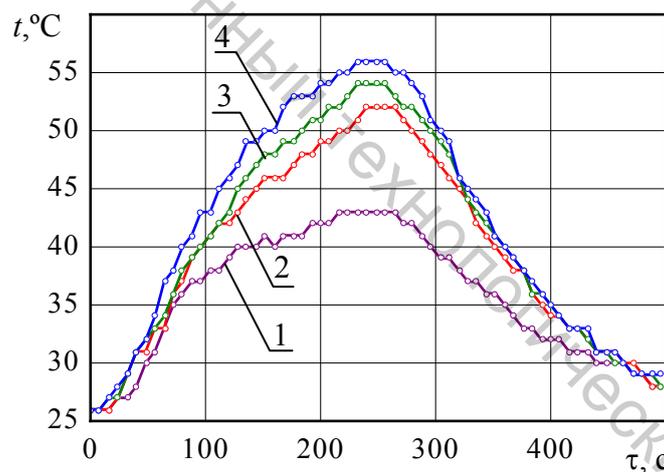


Рисунок 4.7 – Совмещенные экспериментальные зависимости температуры на внутренней поверхности пакета материалов от времени для различных циклов теплового нагружения при плотности теплового воздействия $q_n = 3000 \text{ Вт/м}^2$:

1 – 1 цикл; 2 – 3 цикл;
3 – 5 цикл; 4 – 10 цикл

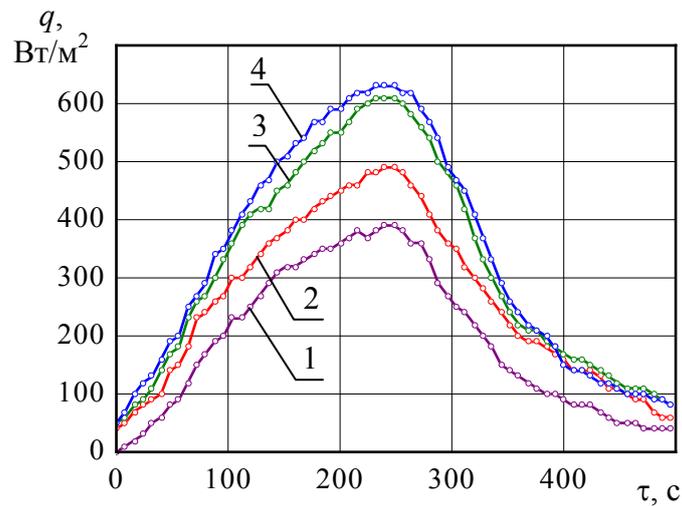


Рисунок 4.8 – Совмещенные экспериментальные зависимости теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов от времени для различных циклов теплового нагружения при плотности теплового воздействия $q_n = 2000 \text{ Вт/м}^2$:

1 – 1 цикл; 2 – 3 цикл;
3 – 5 цикл; 4 – 10 цикл

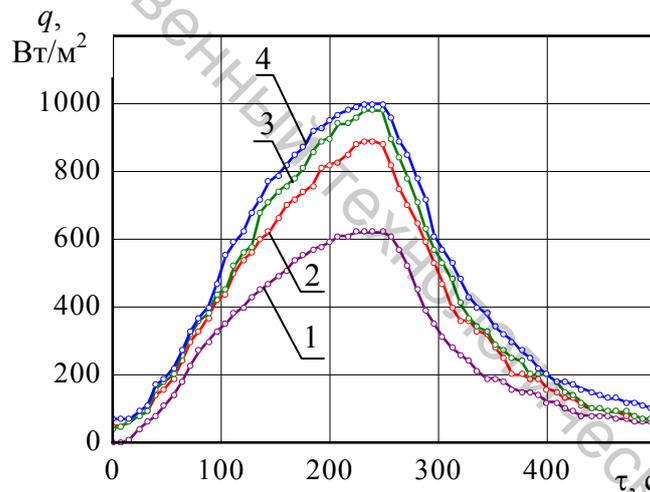


Рисунок 4.9 – Совмещенные экспериментальные зависимости теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов от времени для различных циклов теплового нагружения при плотности теплового воздействия $q_n = 3000 \text{ Вт/м}^2$:

1 – 1 цикл; 2 – 3 цикл;
3 – 5 цикл; 4 – 10 цикл

На основании экспериментальных данных построены зависимости максимальной температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов от количества циклов теплового нагружения при различных значениях теплового воздействия (рис. 4.10, 4.11).

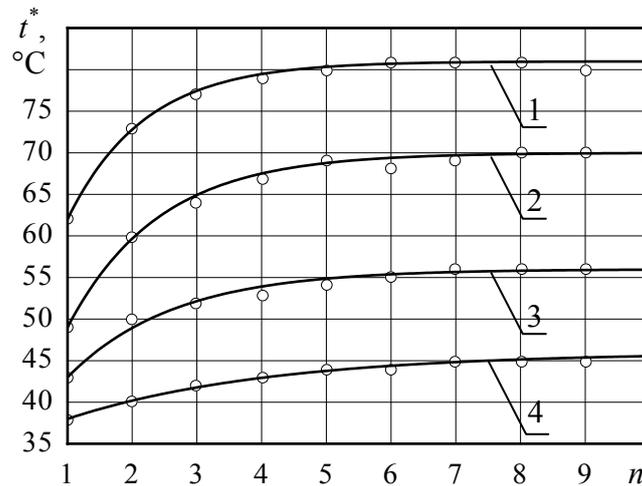


Рисунок 4.10 – Зависимость максимальной температуры на внутренней поверхности пакета материалов от количества циклов теплового нагружения при различных уровнях теплового воздействия:

1 – $q_n = 5000 \text{ Вт/м}^2$; 2 – $q_n = 4000 \text{ Вт/м}^2$;
 3 – $q_n = 3000 \text{ Вт/м}^2$, 4 – $q_n = 2000 \text{ Вт/м}^2$

— – результаты моделирования; ○ – экспериментальные данные

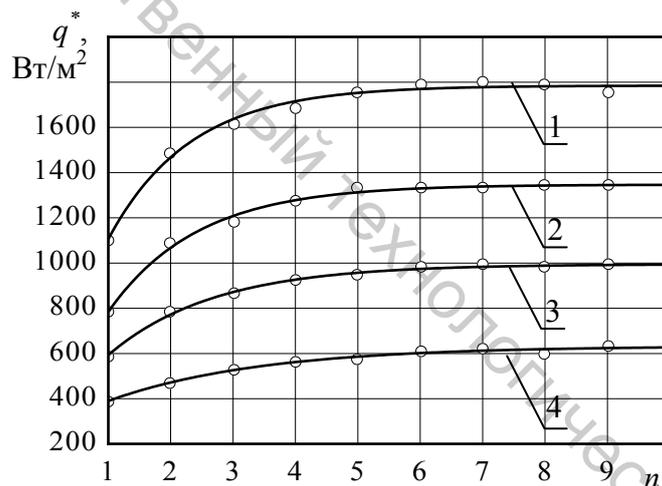


Рисунок 4.11 – Зависимость максимальной плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов от количества циклов теплового нагружения при различных уровнях теплового воздействия:

1 – $q_n = 5000 \text{ Вт/м}^2$; 2 – $q_n = 4000 \text{ Вт/м}^2$;
 3 – $q_n = 3000 \text{ Вт/м}^2$, 4 – $q_n = 2000 \text{ Вт/м}^2$

— – результаты моделирования; ○ – экспериментальные данные

Анализ результатов экспериментальных исследований позволяет отметить, что [144–147]:

– увеличение плотности падающего теплового потока приводит к закономерному увеличению максимальной температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов для данного диапазона теплового воздействия;

– согласно СТБ 1971-2009 [2] безопасным условием эксплуатации БОП является рост температуры на внутренней поверхности пакета материалов в течение испытания не более чем на 50 °С от начальных условий, то есть для проведенных экспериментальных исследований температура на внутренней поверхности пакета материалов не должна превышать 76 °С. Таким образом, многоцикловое 240 секундное тепловое воздействие в диапазоне от 1000 Вт/м² до 4000 Вт/м² не снижает время безопасной эксплуатации по сравнению с нормативным (не менее 240 секунд). Тепловое воздействие в 5000 Вт/м² после 2-го цикла способствует снижению времени безопасной эксплуатации. После 4-го цикла воздействия теплового потока плотностью 5000 Вт/м² время безопасной эксплуатации не будет превышать 225 секунд, что необходимо учитывать при проведении аварийно-спасательных работ;

– рост максимальной температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов при многократном тепловом воздействии косвенным образом указывает на изменение теплофизических свойств материалов, приводящих к снижению устойчивости пакета материалов к воздействию теплового потока;

– после некоторого количества циклов теплового воздействия в пакете материалов наступает состояние близкое к устойчивому (стационарному), при котором максимальная температура на внутренней поверхности пакета материалов остается постоянной и практически не зависит от количества циклов теплового воздействия.

Для оценки параметров предложенных математических моделей (4.4), (4.6), (4.9) и (4.11) обработка результатов экспериментальных исследований производилась с использованием математического статистического пакета Statistica for Windows. Численные значения параметров вероятностных математических моделей (4.4), (4.6) и моделей (4.9), (4.11), полученных на основе применения основного принципа теории надёжности, при различном тепловом воздействии представлены в таблицах 4.1–4.4.

Таблица 4.1 – Результаты математического моделирования процесса изменения максимальной температуры на внутренней поверхности пакета материалов $t^*(n)$ при многоцикловом тепловом нагружении в зависимости от плотности теплового воздействия

Параметры модели (4.4)	Плотность падающего теплового потока, Вт/м ²			
	2000	3000	4000	5000
t_{1}^* , °С	38,0	43,0	49,0	62,0
t_{p}^* , °С	46,1	56,1	69,7	80,9
M , цикл ⁻¹	0,31	0,60	0,71	0,84
d	0,97	0,91	0,90	0,92
Коэффициент детерминации, R^2	0,988	0,986	0,993	0,996

Таблица 4.2 – Результаты математического моделирования процесса изменения максимальной плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов $q^*(n)$ при многоцикловом тепловом нагружении в зависимости от плотности теплового воздействия

Параметры модели (4.6)	Плотность падающего теплового потока, Вт/м ²			
	2000	3000	4000	5000
q_{1}^* , Вт/м ²	390	590	782	1101
q_{p}^* , Вт/м ²	633	1001	1352	1793
N , цикл ⁻¹	0,41	0,58	0,71	0,77
h	1,00	0,90	0,92	0,87
Коэффициент детерминации, R^2	0,989	0,998	0,992	0,992

Таблица 4.3 – Результаты математического моделирования процесса изменения максимальной температуры на внутренней поверхности пакета материалов $t^*(n)$ при многоцикловом тепловом нагружении в зависимости от плотности теплового воздействия

Параметры модели (4.9)	Плотность падающего теплового потока, Вт/м ²			
	2000	3000	4000	5000
t_{1}^* , °С	38,0	43,0	49,0	62,0
t_{p}^* , °С	46,0	55,9	69,5	80,8
M , цикл ⁻¹	0,32	0,61	0,71	0,84
Коэффициент детерминации, R^2	0,988	0,980	0,992	0,995

Таблица 4.4 – Результаты математического моделирования процесса изменения максимальной плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов $q^*(n)$ при многоцикловом тепловом нагружении в зависимости от плотности теплового воздействия

Параметры модели (4.11)	Плотность падающего теплового потока, Вт/м ²			
	2000	3000	4000	5000
q_{1}^* , Вт/м ²	390	593	784	1106
q_{p}^* , Вт/м ²	633	995	1347	1785
N , цикл ⁻¹	0,41	0,59	0,70	0,76
Коэффициент детерминации, R^2	0,989	0,997	0,991	0,991

Анализ результатов математического моделирования процесса изменения показателей теплофизических свойств пакета материалов боевой одежды пожарных при циклическом тепловом нагружении, представленных в таблицах 4.1–4.4, позволяет отметить что [144–146]:

– математические модели изменения максимальной температуры (4.4), (4.9) и плотности теплового потока (4.6), (4.11) на внутренней поверхности пакета материалов боевой одежды пожарных в процессе ис-

пытания на устойчивость к многократному тепловому воздействию адекватны результатам эксперимента с доверительной вероятностью 0,98 в исследованном диапазоне теплового воздействия;

– численные значения параметров t_1^* , t_p^* моделей (4.4), (4.9) и параметров q_1^* , q_p^* моделей (4.6), (4.11) в исследованном диапазоне теплового воздействия зависят от условий проведения испытания пакета на устойчивость к многократному тепловому воздействию и определяются теплофизическими свойствами материалов пакета;

– увеличение плотности падающего теплового потока q_n приводит к закономерному увеличению t_p^* и q_p^* в исследованном диапазоне теплового воздействия. Можно отметить линейный характер зависимостей t_p^* моделей (4.4), (4.9) и q_p^* моделей (4.6), (4.11) от плотности теплового нагружения q_n ;

– численные значения темповых параметров M моделей (4.4), (4.9) и N моделей (4.6), (4.11) зависят от плотности тепловой нагрузки q_n в исследованном диапазоне ее значений и определяются теплофизическими свойствами материалов пакета;

– для всех исследуемых образцов пакетов численные значения параметров d и h моделей (4.4), (4.6) практически одинаковы и стремятся к 1. Данный факт указывает на стационарность рассматриваемого процесса изменения показателей теплофизических свойств пакета материалов БОП в процессе многоциклового теплового воздействия.

На основании математических моделей (4.10) и (4.12) получены и представлены на рисунках 4.12, 4.13 зависимости интенсивности изменения максимальной температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета при испытании на многократное тепловое воздействие от количества циклов нагружения теплового потока плотностью от 1000 Вт/м² до 5000 Вт/м² [144, 145].

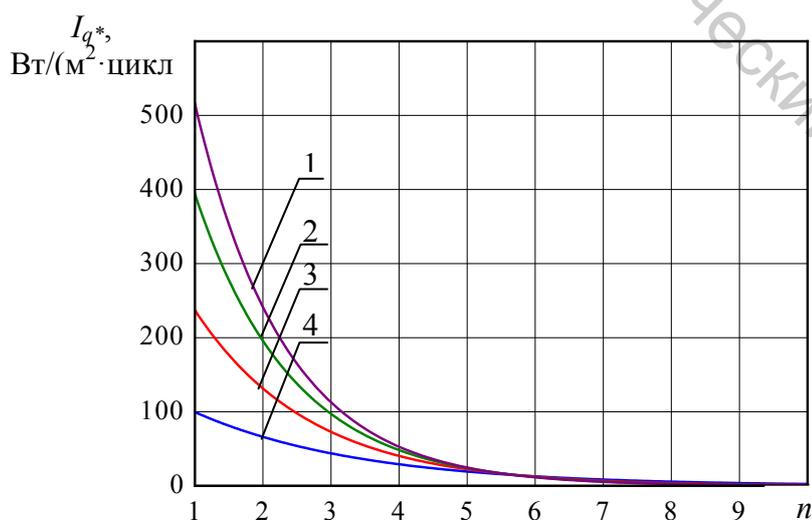


Рисунок 4.12 – Зависимость интенсивности процесса изменения максимальной плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета от количества циклов теплового нагружения при различных значениях теплового воздействия: 1 – $q_n = 5000$ Вт/м²; 2 – $q_n = 4000$ Вт/м²; 3 – $q_n = 3000$ Вт/м², 4 – $q_n = 2000$ Вт/м²

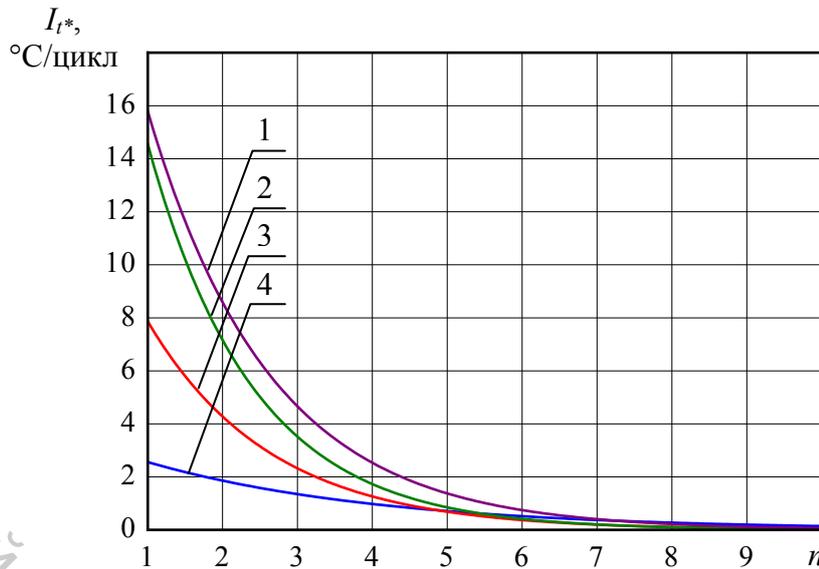


Рисунок 4.13 – Зависимость интенсивности процесса изменения максимальной температуры на внутренней поверхности пакета материалов от количества циклов теплового нагружения при различных значениях теплового воздействия:

1 – $q_n = 5000 \text{ Вт/м}^2$; 2 – $q_n = 4000 \text{ Вт/м}^2$; 3 – $q_n = 3000 \text{ Вт/м}^2$, 4 – $q_n = 2000 \text{ Вт/м}^2$

Анализ зависимостей, представленных на рисунках 4.12 и 4.13, позволяет отметить, что [144, 145]:

- в исследованном диапазоне теплового воздействия увеличение количества циклов нагружения приводит к закономерному снижению интенсивности процесса изменения максимальной температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета материалов;

- плотность падающего теплового потока q_n влияет на начальное значение интенсивности процесса изменения максимальной температуры $I_t^*(n)$ и плотности теплового потока $I_q^*(n)$ на внутренней поверхности пакета материалов, однако начиная с восьмого цикла теплового нагружения численные значения $I_t^*(n)$ и $I_q^*(n)$ незначительно зависят от уровня падающего теплового потока q_n ($I_t^*(n=8) = 0,1 - 0,2 \text{ } ^\circ\text{C/цикл}$ для $q_n \leq 5000 \text{ Вт/м}^2$). Следовательно, изменение теплофизических свойств пакета материалов происходит в течение первых восьми циклов теплового воздействия, а в дальнейшем наступает состояние, при которых показатели теплофизических свойств пакета остаются постоянными и не зависят от количества циклов теплового воздействия.

Таким образом, использование математических моделей (4.4), (4.6), (4.9) и (4.11) существенно повышает информативность экспериментальных исследований и позволяет осуществить прогноз численных значений показателей теплофизических свойств пакета материалов БОП при многоцикловом тепловом воздействии, а также определить эффективное количество циклов теплового нагружения, после которых показатели теплофизических свойств пакета остаются постоянными и не зависят от количества циклов теплового воздействия.

РЕЗЮМЕ

1. Получены экспериментальные зависимости температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета при многоцикловом тепловом воздействии, разработаны математические модели, позволяющие прогнозировать максимальную температуру и плотность теплового потока на внутренней поверхности пакета при проведении испытаний на устойчивость к многократному тепловому воздействию и методологический подход к исследованию влияния многоцикловых нагрузок на показатели теплофизических свойств пакетов материалов.

2. В результате комплексного анализа результатов исследований показано, что разработанные математические модели изменения показателей теплофизических свойств пакета материалов при испытаниях на устойчивость к многократному тепловому воздействию адекватны результатам эксперимента. Численные значения коэффициента детерминации данных моделей в исследованном диапазоне тепловых нагрузок находятся в пределах от 0,98 до 0,99.

3. При проведении математического моделирования установлено, что численные значения установившейся максимальной температуры (максимальной плотности теплового потока) на внутренней поверхности пакета t_p^* (q_p^*), а так же максимальной температуры (максимальной плотности теплового потока) на внутренней поверхности пакета при первом цикле теплового нагружения пакета t_1^* (q_1^*) разработанных математических моделей зависят от условий проведения испытания пакета на устойчивость к многократному тепловому воздействию и определяются теплофизическими свойствами материалов пакета.

4. Для всех исследуемых образцов пакетов численные значения параметров нестационарности d и h вероятностных математических моделей взаимосвязи максимальной температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета от количества циклов теплового воздействия практически одинаковы и стремятся к 1. Данный факт указывает на стационарность рассматриваемого процесса изменения показателей теплофизических свойств пакета материалов боевой одежды пожарных в процессе многоциклового теплового воздействия.

ГЛАВА 5

РАЗРАБОТКА ЭКСПРЕСС-МЕТОДОВ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ БЕЗОПАСНОГО СРОКА СЛУЖБЫ БОЕВОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Боевая одежда пожарных – главное и самое массовое средство индивидуальной защиты пожарных. Она используется при тушении всех видов пожаров. Во время эксплуатации БОП испытывает различные внешние воздействия: тепловые и механические, воды и агрессивных сред, а также климатические воздействия, которые приводят к старению материала, то есть к необратимым изменениям структуры его волокон и ухудшению их свойств. Эти изменения обусловлены реакциями деструкции (разрывом химических связей, распадом полимерной цепи) и структурирования (сшиванием макромолекул, образованием поперечных химических связей между макромолекулами). Изменения структуры и свойств волокон непременно приводят к изменению физико-механических и теплофизических свойств материала [132–134, 148].

Согласно СТБ 1971-2009 [5] срок службы БОП – не менее двух лет от даты начала применения. В ходе эксплуатации после окончания аварийно-спасательных работ БОП подвергается внешнему осмотру и ремонту: БОП с незначительными повреждениями верхнего слоя (общей площадью до 0,8 дм²) ремонтируют в условиях пожарной части с использованием ремонтного комплекта, если БОП имеет значительные повреждения – дальнейшая ее эксплуатация запрещена.

Однако использование только визуального контроля неизбежно влечет за собой субъективность оценки показателей, определяющих качество материалов, и, как следствие, невозможность достоверно и объективно оценить эффективный срок их эксплуатации. К. Slater в работе [32] отмечает, что уровень разрушения текстильного материала не может быть напрямую связан с визуальными индикаторами повреждения ткани, что значения показателей качества текстильного материала в процессе его эксплуатации становятся ниже нормативных требований прежде, чем появляются визуально очевидные повреждения ткани. Это указывает на потребность в расширенном визуальном осмотре или других не визуальных методах выявления степени разрушения материала [37].

Целью исследований, проводимых в данной главе, является разработка неразрушающих методов оценки безопасного срока службы БОП, как готового изделия, что позволит выявить резервы ее эксплуатационной надежности, прогнозировать эффективный срок службы и, соответственно, повысить надежность и конкурентоспособность БОП.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие основные задачи:

– теоретическое обоснование закономерностей изменения эксплуатационных свойств боевой одежды пожарных в процессе многократного воздействия основных факторов износа с разработкой соответствующих математических моделей;

– экспериментальные исследования закономерностей изменения показателей эксплуатационных боевой одежды пожарных в процессе многократного воздействия основных эксплуатационных факторов;

– разработка экспресс-методов прогнозирования безопасного срока службы боевой одежды пожарных при эксплуатации.

5.1 Теоретический анализ закономерностей изменения эксплуатационных свойств боевой одежды пожарных в процессе многократного воздействия основных факторов износа

5.1.1 Общие сведения об износостойкости текстильных изделий и критериях оценки износа

Изнашиванием называют процесс, вызывающий ухудшение свойств или постепенное разрушение материала под действием различных факторов [80].

Результат изнашивания называют условным термином «износ». Износ – это результат изнашивания, которое проявляется в видимом разрушении или в снижении показателей свойств материала. Различают общий и местный износ. Общий износ распространяется по всей поверхности материала, делая его непригодным для последующего применения. Местный износ характеризуется образованием дефектов в отдельных местах при целостности значительной части материала [80].

Способность материала противостоять действию внешних факторов изнашивания, то есть сохранять свои начальные эксплуатационные показатели в заданных пределах, характеризует *износостойкость* [80, 149]. Это определение хорошо согласуется с термином «надежность» по ГОСТ 13377-75: «Надежность – это свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработке». Поэтому оценивая износостойкость материала, фактически определяют его надежность [149, 150].

Все разнообразные причины, или факторы, износа можно разделить на следующие группы [80]:

– физико-химические: действие света, атмосферы, воды, пота, моющей жидкости, нагрева и т. д;

- механические – истирание, утомление от многократных деформаций и др;
- биологические – разрушение микроорганизмами и повреждения насекомыми;
- комбинированные – светопогода, стирка, истирание с утомлением и т. д.

Износ текстильных изделий обуславливается разными факторами и различным их сочетанием. Однако учитывая основные условия эксплуатации изделия, можно выделить несколько факторов, влияние которых определяет надежность изделий. Например, главными факторами износа бытовой одежды являются истирание, утомление, стирка или химчистка [80].

Для оценки износостойкости текстильных полотен обычно используют два критерия:

- число воздействий (изнашивающих циклов), вызывающих разрушение образца;
- время от начала приложения воздействий до разрушения материала (его долговечность или срок службы).

Так как изнашивание текстильных полотен протекает во времени, то для оценки этого процесса обычно используются *кинетические характеристики (критерии) износа*. Они дают информацию не только о начальном значении критерия (показателя качества) для неношеного материала, но и об его изменении в процессе эксплуатации или при лабораторном изнашивании с помощью приборов [80].

Кинетические характеристики износа можно наглядно изобразить графически (рисунок 5.1) и в общем виде можно выразить математическими моделями:

$$u = u_0 - mx^b - nx^v ; \quad (5.1)$$

$$y = 100 - ax^b - cx^v , \quad (5.2)$$

где u и $y = 100u/u_0$ – абсолютное и относительное значения позитивного показателя качества (критерия) после x циклов износа; u_0 – начальное значение абсолютного критерия для неношеного материала; m, n, b, v, a, c – константы уравнений, зависящие от вида материала и факторов износа.

Для прогнозирования срока службы x_m изделия необходимо определить минимально допустимое значение позитивного критерия u_{\min} или y_{\min} для годного изделия. Подставив эти значения в уравнения (1.1) или (1.2), решают их относительно x , которое соответствует сроку службы x_m в циклах износа.

В настоящее время оценка износостойкости проводится двумя основными способами: проведением опытных носок (изучение процесса изнашивания изделия в условиях реальной эксплуатации), лабораторным изнашиванием образцов с использованием специальных методов и приборов [149].

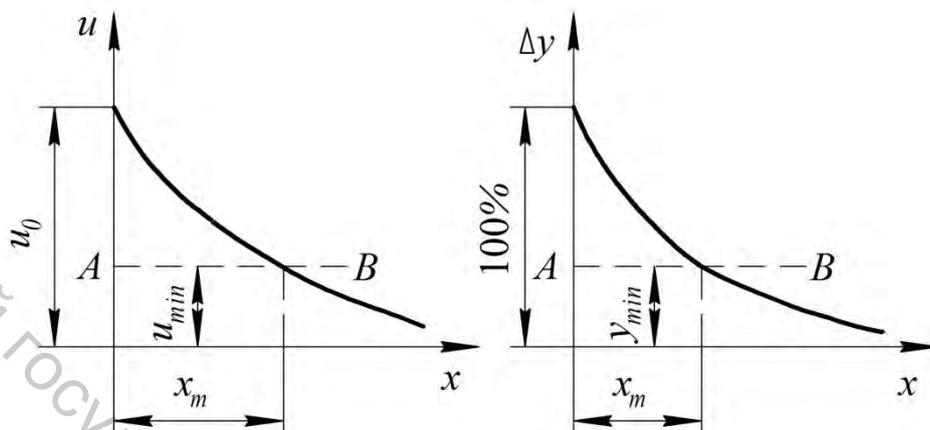


Рисунок 5.1 – Кинетические характеристики износа для абсолютного (а) и относительного (б) критериев износостойкости [80, с. 214, рисунок VI.6]

Наиболее полное представление о надежности свойств ткани можно получить при опытной носке. Длительные наблюдения за поведением тканей в процессе эксплуатации позволяют выявить топографию износа изделий, видимые изменения поверхности ткани, получить кинетику изменения наиболее важных показателей качества, установить срок ее службы. Однако, проведение опытных носок требует значительных затрат времени и средств [149]. Кроме того результаты различных опытных носок не всегда сравнимы, так как зависят от условий работы носчика. Большое влияние на оцениваемый результат оказывают индивидуальные особенности носчика, из-за чего разброс измеряемого параметра получается значительным. Основным недостатком проведения опытных носок как метода оценки качества одежды является длительность процесса.

Лабораторные методы изнашивания тканей не имеют этих недостатков. С помощью лабораторных приборов можно быстро и при одинаковых условиях оценить качество и надежность ткани. Это очень важно при разработке тканей новых структур, использовании новых видов волокон. Однако при испытаниях по этому методу возникают трудности, связанные со сложностью воспроизведения полного эксплуатационного характера изнашивания ткани, то есть воспроизведение того разнообразия воздействий на ткань, которое имеет место при эксплуатации. Ускорение испытаний в лабораторных условиях достигается усилением действия изнашивающих факторов: увеличение давлений, температур, скоростей и т. п. [149].

Для оценки износостойкости СЗО пожарных также можно использовать указанные выше критерии (число воздействий, срок служ-

бы), но в качестве отказа использовать не разрушение материала защитной одежды, так как это приведет к риску для жизни пожарного, а критическое снижение показателя качества по отношению к нормативным требованиям. Так, например, процесс определения устойчивости пакета материалов к воздействию теплового потока не связан с разрушением материала и может производиться как для проб пакета материалов, так и для готового изделия и в процессе определения совершается регистрация значения плотности теплового потока, прошедшего через пробу, и температуры на внутренней поверхности пробы.

До настоящего времени существует крайне ограниченное количество исследований, направленных на установление теоретических закономерностей, оценку и прогнозирование качества защитной одежды пожарных в процессе ее эксплуатации [37, 151]. Отсутствие информации об изменении теплозащитных свойств, а также методики проведения эксплуатационных испытаний, регламентированной стандартом, сдерживает совершенствование существующих и разработку новых материалов для изготовления СЗО пожарных.

Известно [144, 145], что одним из показателей теплофизических свойств, значение которого изменяется в процессе влияния одного из основных факторов износа, многократного теплового воздействия, является температура на внутренней поверхности пакета материалов защитной одежды пожарных.

Следует отметить, что и одним из критериев оценки результатов нормативных испытаний пакета материалов на устойчивости к воздействию теплового потока является рост температуры на внутренней поверхности пакета материала в течение испытания не более чем на $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ от начального значения.

На основании выше изложенного, в качестве показателя эксплуатационных свойств боевой одежды пожарных выбрано время, за которое температура на внутренней поверхности пакета материалов изменится на $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ при воздействии теплового потока плотностью 5000 Вт/м^2 . Данный показатель идентичен устойчивости пакета материалов к воздействию теплового потока, который является нормативным показателем, но в отличие от него дает количественную оценку и позволяет оценить динамику изменения теплозащитных свойств пакета материалов при многоцикловом воздействии различных факторов износа [152, 153].

Для удобства дальнейшего использования назовем описанный выше показатель эксплуатационных свойств БОП, по аналогии с действующими техническими нормативными правовыми актами, как *эксплуатационная устойчивость пакета материалов к тепловому воздействию*.

Использование данного показателя для оценки эксплуатационных свойств БОП имеет ряд преимуществ:

– оценка эксплуатационной устойчивости пакета материалов к тепловому воздействию не связана с повреждением или разрушением образца и может производиться как для проб пакета материалов, так и для готового изделия;

– используемое при оценке эксплуатационной устойчивости пакета материалов к тепловому воздействию оборудование и средства измерения соответствуют СТБ 1971-2009 и имеются в наличии в аккредитованных лабораториях МЧС РБ.

Исследование закономерностей изменения эксплуатационной устойчивости пакета материалов при циклическом воздействии основных факторов износа может позволить разработать научные основы для осуществления экспресс-оценки безопасного срока службы боевой одежды пожарных при эксплуатации.

5.1.2 Разработка вероятностных математических моделей изменения эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов боевой одежды пожарных в процессе многократного воздействия основных факторов износа

Предположив, что процесс изменения теплозащитных свойств боевой одежды пожарных при эксплуатации идентичен нестационарному процессу накопления уровня повреждений в процессе Пуассона, то применительно к эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов боевой одежды пожарных в процессе многократного воздействия основных факторов износа можно записать [139, 140]:

$$\frac{Y_0 - Y(\tau)}{Y_0 - Y_p} = F(\tau) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\tau}{b}\right)^d\right], \quad (5.3)$$

или учитывая, что время эксплуатации пропорционально числу циклов воздействия факторов износа, то модель (5.3) можно представить в следующем виде:

$$\frac{Y_0 - Y(n)}{Y_0 - Y_p} = F(n) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{n}{b}\right)^d\right], \quad (5.4)$$

где Y_0 – начальное значение эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов боевой одежды пожарных, с; $Y(n)$ – текущее значение эксплуатационной устойчивости к воздействию

теплового потока пакета материалов боевой одежды пожарных после n циклов нагружения, с; Y_p – значение эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов БОП, соответствующее состоянию пакета, при котором устойчивость материалов остается постоянной и не зависит от количества циклов нагружения, с; $n = 1, 2, 3, \dots$ – количество циклов воздействия основных эксплуатационных факторов, цикл; $F(n)$ – интегральная функция распределения, характеризующая вероятность того, что эксплуатационная устойчивость к воздействию теплового потока пакета материалов боевой одежды пожарных достигнет критического значения до совершения n числа циклов воздействия.

Введя обозначение:

$$\frac{1}{b^d} = M^d,$$

математическую модель (5.2) удобно представить в виде:

$$\frac{Y_0 - Y(n)}{Y_0 - Y_p} = 1 - \exp[-M^d n^d],$$

или

$$Y(n) = Y_p + (Y_0 - Y_p) \cdot \exp[-M^d n^d]. \quad (5.5)$$

По аналогии с выражением (4.4), параметр M модели (5.5) является величиной обратной количеству циклов нагружения [цикл⁻¹], по истечении которых текущее изменение эксплуатационной устойчивости пакета материалов по отношению к критической устойчивости ($Y(n) - Y_p$) меньше максимально возможного ($Y_0 - Y_p$) в e раз для данного пакета материалов.

Очевидно, что при $n = 0$ значение $Y(n) = Y_0$, а при $n \rightarrow \infty$, $Y(n) = Y_p$.

Использование математической модели (5.5) позволяет провести анализ интенсивности процесса изменения эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов БОП при многократном воздействии основных эксплуатационных факторов:

$$I_Y(n) = \frac{dY(n)}{dn} = M^d \cdot n^{d-1} \cdot d \cdot (Y_0 - Y_p) \cdot \exp[-M^d n^d], \quad (5.6)$$

где $I_Y(n)$ – интенсивность процесса изменения эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета боевой одежды пожарных, с/цикл.

Предположив, что существует такое число циклов нагружения n_{cp} , при котором текущее значение эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов БОП численно равно среднему арифметическому значению параметров Y_0 и Y_p модели (5.5):

$$Y(n_{cp}) = \frac{1}{2}(Y_0 + Y_p). \quad (5.7)$$

Тогда подставляя равенство (5.7) в модель (5.5), получено:

$$\frac{1}{2}(Y_0 + Y_p) = Y_p + (Y_0 - Y_p) \cdot \exp[-M^d n_{cp}^d]. \quad (5.8)$$

После преобразований модель (5.8) можно представить в виде:

$$\frac{1}{2} = \exp[-M^d n_{cp}^d] \Rightarrow M^d = \frac{\ln 2}{n_{cp}^d}. \quad (5.9)$$

Подставив соотношение (5.9) в модель (5.5) и обозначив $m = n/n_{cp}$, получено:

$$Y(m) = Y_p + (Y_0 - Y_p) \cdot \exp[-Hm^d]. \quad (5.10)$$

где m – безразмерное число циклов воздействия основных эксплуатационных факторов; H – константа модели, имеющая постоянное значение $H = \ln 2 = 0,693$.

Обозначив

$$U(m) = \frac{Y(m)}{Y_0}; U_0 = \frac{Y_p}{Y_0}, \quad (5.11)$$

модель (5.8) можно представить в безразмерной форме:

$$U(m) = U_0 + (1 - U_0) \cdot \exp[-Hm^d], \quad (5.12)$$

где $U(m)$ – параметр модели, численно равный отношению текущего значения эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов боевой одежды пожарных после m циклов нагружения к начальному значению эксплуатационной устойчивости

пакета материалов; U_0 – параметр модели, равный отношению критического значения эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов боевой одежды пожарных к начальному значению эксплуатационной устойчивости пакета материалов БОП.

Очевидно, что при $m \rightarrow 0$ значение $U(m) \rightarrow 1$, а при $m \rightarrow \infty$, $U(m) \rightarrow U_0$.

Представление математической модели (5.5) в безразмерной форме (5.12) позволяет заменить семейство моделей, обладающих различными значениями темпового показателя M (рис. 5.2).

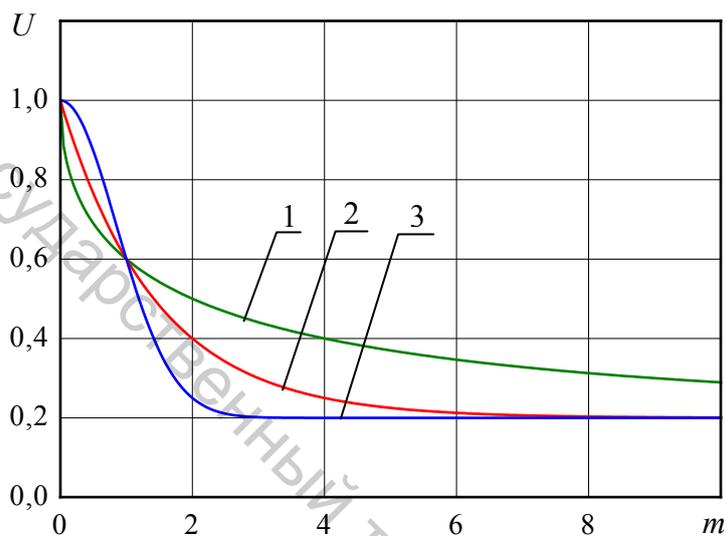


Рисунок 5.2 – Зависимости U от относительного числа циклов нагружения m при $U_0 = 0,2$, построенные по модели (5.12) при различных значениях d :
1 – при $d = 0,5$; 2 – при $d = 1$; 3 – при $d = 2$

Таким образом, на основании анализа процесса изменения эксплуатационных свойств пакета материалов боевой одежды пожарных в процессе многократного воздействия основных факторов износа и интерпретации этих результатов с вероятностной точки зрения, разработаны математические модели взаимосвязи эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов, а также интенсивности процесса изменения эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока от количества циклов воздействия основных эксплуатационных факторов.

Применение данных моделей позволит осуществлять прогноз показателей теплозащитных свойств боевой одежды пожарных при эксплуатации.

5.1.3 Разработка математических моделей изменения эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов боевой одежды пожарных в процессе многократного воздействия различных факторов износа с использованием основного принципа теории надёжности профессора Н.М. Седякина

Применительно к процессу снижения эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов БОП при многократном воздействии различных факторов износа основной физической принцип теории надёжности можно сформулировать следующим образом [139, 140]:

«Скорость изменения эксплуатационной устойчивости пакета материалов БОП к воздействию теплового потока dY/dn не зависит от того, как и за какое время (количество циклов нагружения n) она изменилась от некоторого начального значения Y_0 до текущего Y в рассматриваемый момент времени, а зависит от условий проведения испытания и теплофизических свойств материалов пакета».

Запись этого принципа в дифференциальной форме с учётом высказанной гипотезы имеет следующий вид:

$$\frac{dY}{dn} = -M \cdot [Y - Y_p]^p, \quad (5.11)$$

где M – параметр модели, отражающий темп изменения эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов БОП; p – параметр модели, принимающий значение 1, 2, ...

Решение дифференциального уравнения (5.11) при условии $p = 1$ имеет следующий вид [152]:

$$\int_{Y_0}^Y \frac{dY}{(Y - Y_p)} = -M \int_0^n dn \Rightarrow \ln \left| \frac{Y - Y_p}{Y_0 - Y_p} \right| = -M \cdot n, \quad (5.12)$$
$$Y(n) = Y_p + (Y_0 - Y_p) \cdot \exp[-M \cdot n].$$

Параметр M модели (5.12) имеет смысл, аналогичный соответствующему параметру модели (5.3) при условии, что $d = 1$. Следовательно, темповой параметр M модели (5.11) имеет размерность [цикл⁻¹] и является величиной обратной количеству циклов воздействия, необходимых для выполнения следующего условия:

$$\frac{Y(n') - Y_p}{Y_0 - Y_p} = \exp(-1).$$

Очевидно, что при $n = 0$ значение $Y(n) = Y_0$, а при $n \rightarrow \infty$, $Y(n) = Y_p^*$.

Использование математической модели (5.11) позволяет провести анализ интенсивности процесса изменения эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов БОП при многократном воздействии основных эксплуатационных факторов:

$$I_Y(n) = \frac{dY(n)}{dn} = M \cdot (Y_0 - Y_p) \cdot \exp[-M \cdot n], \quad (5.13)$$

где $I_Y(n)$ – интенсивность процесса изменения эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов БОП, с/цикл.

После подстановки соотношения (5.5) в модель (5.12) и осуществления простейших преобразования, получено

$$M = \frac{\ln 2}{n_{cp}}. \quad (5.14)$$

Подставив соотношение (5.14) в модель (5.12) и обозначив $m = n/n_{cp}$, получено

$$Y(m) = Y_p + (Y_0 - Y_p) \cdot \exp[-Hm], \quad (5.15)$$

где m – безразмерное число циклов воздействия основных эксплуатационных факторов; H – константа модели, имеющая постоянное значение $H = \ln 2 = 0,693$.

Математическая модель (5.15) в безразмерной форме с учётом обозначений (5.9) имеет следующий вид:

$$U(m) = U_0 + (1 - U_0) \cdot \exp[-Hm]. \quad (5.16)$$

Очевидно, что при $m \rightarrow 0$ значение $U(m) \rightarrow 1$, а при $m \rightarrow \infty$, $U(m) \rightarrow U_0$. Представление математической модели (5.12) в безразмерной форме (5.16) позволяет заменить семейство моделей, обладающих различными значениями темпового показателя M (рис. 5.3).

Примеры реализации основного физического принципа теории надёжности (7.1) при $p \geq 2$ в данной работе рассматриваться не будут,

вследствие ограниченности применения данных математических моделей [141].

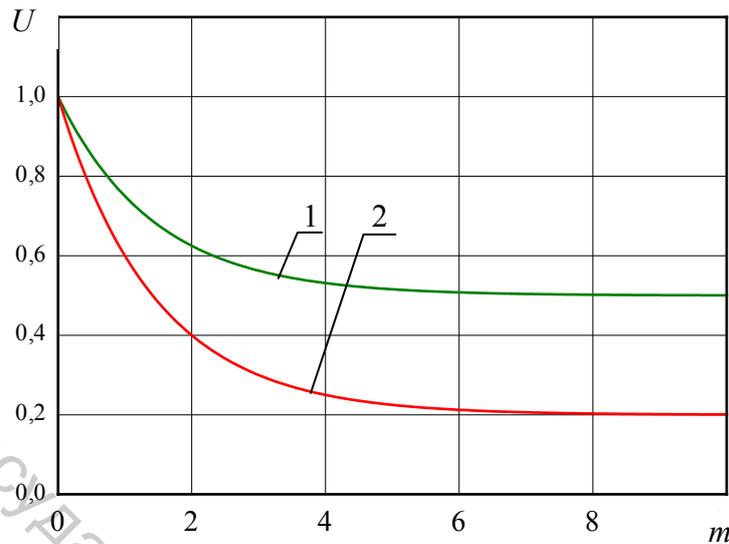


Рисунок 5.3 – Зависимость U от относительного числа циклов нагружения m при различных значениях U_0 :

1 – при $U_0 = 0,5$; 2 – при $U_0 = 0,2$

Таким образом, в результате теоретического анализа закономерностей изменения эксплуатационных свойств пакета материалов боевой одежды пожарных при многократном воздействии основных факторов износа разработаны математические модели взаимосвязи эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов и количества циклов воздействия основных эксплуатационных факторов, применение которых позволит осуществить прогноз срока службы защитной одежды пожарных при эксплуатации по результатам кратковременных испытаний с разработкой соответствующей методики.

5.2 Экспериментальные исследования закономерностей изменения эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов боевой одежды пожарных при многократном воздействии основных факторов износа

Объектом экспериментальных исследований степени влияния основных эксплуатационных факторов на теплозащитные свойства защитной одежды пожарных являлся пакет материалов, используемый при изготовлении БОП для подразделений МЧС РБ и состоящий из материала верха совмещенного с водонепроницаемым слоем – ткань саржевого переплетения, в основе и утке которой использовались крученые

нити линейной плотности 29 текс × 2 из термостойкого синтетического волокна «Арселон-С», ткань с поверхностной плотностью 223 г/м² с нанесенным мембранным полиуретановым покрытием ТУ 80005044.003-2012, плотность ткани по основе 220 нитей на 10 см, по утку – 160 нитей на 10 см; *теплоизоляционной подстежки* – нетканое холстопршивное полотно (полиэфир – 50 %, арселон – 50 %), поверхностная плотность 300 г/м², ТУ ВУ 200352162.004-2010; *подкладочной ткани* – 100 % полиэфирная ткань полотняного переплетения, поверхностная плотность 80 г/м².

Для исследований было отобрано 5 проб пакета материалов размером 210×70 мм. Перед испытаниями пробы материалов были выдержаны в климатических условиях по ГОСТ 10681 и тщательно визуально осмотрены для выявления видимых дефектов, комплектности, состояния поверхностей.

В ходе комплекса экспериментальных исследований реальные условия, которые защитная одежда пожарных испытывает в процесс эксплуатации, моделировались при помощи лабораторных воздействий различными факторами износа.

Испытания проводились циклически и состояли из этапов механических, тепловых и влажно-тепловых воздействий, действующих на материалы по отдельности, попарно и совместно. Один этап механических, тепловых и влажно-тепловых воздействий включал, соответственно:

1. Многократный изгиб и истирание материала верха мягким абразивом в течение 700 циклов.
2. Воздействие на пакет материалов теплового потока плотностью 5000 Вт/м² в течение 240 секунд и 40000 Вт/м² в течение 5 секунд.
3. Стирка материала верха в растворе синтетического моющего средства при температуре плюс 40 °С.

Методика и средства для осуществления многократного изгиба и истирания материала верха соответствуют СТБ 1972-2009 [126, с. 31, приложение Л] с некоторыми дополнениями. Испытания проводят на установке, конструкция которой обеспечивает возвратно-поступательное движение абразива и пробы и многократный изгиб пробы. Схема установки показана на рисунке 5.4.

В качестве абразива используют сукно серошинельное ГОСТ 27542. Площадь поверхности абразивного материала, которая соприкасается с поверхностью испытываемой пробы, составляет 0,01 м².

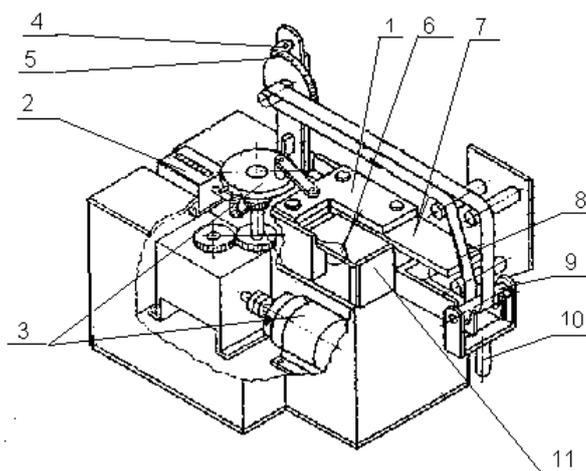


Рисунок 5.4 – Схема установки для осуществления многократного изгиба и истирания материала верха:

- 1 – рамка; 2 – счетчик числа циклов перемещения абразива; 3 – редуктор с кривошипно-шатунным механизмом; 4 – собачка; 5 – храповое колесо; 6 – лампочка; 7 – планка; 8 – абразивная лента; 9 – ролик; 10 – груз; 11 – пластмассовый угол

Методика осуществления многократного изгиба и истирания материала верха состоит из следующей последовательности шагов [126, с. 31, приложение Л]:

1. Пробу закрепляют на рамке, часть пробы огибают вокруг планки.
2. К концу пробы подвешивают груз массой ($1 \pm 0,01$) кг для натяжения и пробу закрепляют винтом, после чего груз снимают.
3. Рамку с закрепленной пробой устанавливают на направляющие столика в середине хода и свисающий со столика угол пробы фиксируют двумя зажимами с грузами, масса которых равна ($1 \pm 0,01$) кг.
4. Счетчик числа циклов перемещения абразива устанавливают на ноль и включают прибор.
5. Проводят 700 циклов истирания и многократного изгиба для материала верха.
6. Прибор останавливают, с подвески снимают грузы, пробу вынимают из зажимов.

Методика теплового воздействия на пакет материалов состоит из следующей последовательности шагов [5, с. 12, приложение А]:

1. Подключают радиационную панель и систему охлаждения установки по определению устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов, а также регистрирующие приборы к источникам, соответственно, электропитания и водоснабжения.
2. Радиационную панель прогревают в течение (25 ± 5) мин от начала подключения к источнику электропитания.
3. Поднимают защитную заслонку радиационной панели, от-

крывая доступ теплового потока к датчику для измерения плотности теплового потока.

4. Изменяя расстояние между радиационной панелью и датчиком для измерения теплового потока, устанавливают держатель образца на таком расстоянии от радиационной панели, при котором значение плотности теплового потока, падающего на пробу, равно 5000 Вт/м^2 .

5. Опускают заслонку и фиксируют расстояние от радиационной панели до держателя образца.

6. Устанавливают пакет материалов на держателе с помощью зажимов и устройства натяжения.

7. Поднимают защитную заслонку радиационной панели и выдерживают пакет материалов под действием теплового потока установленной плотности в течение 240 секунд.

8. По истечении времени теплового воздействия защитную заслонку радиационной панели опускают. Проба пакета материалов изымается из держателя.

9. Изменяя расстояние между радиационной панелью и датчиком с пробой, устанавливают плотность теплового потока 40000 Вт/м^2 .

10. Опускают заслонку и фиксируют расстояние от экрана до держателя на платформе.

11. Закрепляют пробу пакета материалов на рабочем участке датчика с помощью зажимов и устройства натяжения.

12. Поднимают защитную заслонку радиационной панели и выдерживают пробу под действием теплового потока установленной плотности в течение 5 секунд.

13. По истечении времени теплового воздействия защитную заслонку радиационной панели опускают. Проба пакета материалов изымается из держателя.

Стирка материала верха регламентирована СТБ 1971-2009 [5, с. 11] и осуществляется в растворе синтетического моющего средства при температуре плюс $40 \text{ }^\circ\text{C}$ в стиральных машинах барабанного типа.

До испытания и периодически, после соответствующего цикла нагружения, проводилась оценка времени, за которое температура на внутренней поверхности пакета материалов изменится на $50 \text{ }^\circ\text{C}$ при воздействии теплового потока плотностью 5000 Вт/м^2 и соответствующее, как упоминалось ранее, эксплуатационной устойчивости пакета материалов к тепловому воздействию.

При проведении исследований на эксплуатационную устойчивость пакета к тепловому воздействию применялось испытательное оборудование и средства измерения, приведенные в таблице 2.1.

Методика проведения испытаний на эксплуатационную устойчивость пакета к тепловому воздействию соответствует нормативным испытаниям на устойчивость к воздействию теплового потока пакета ма-

териалов [5, с. 12, приложение А] с некоторыми дополнениями и состоит из следующей последовательности шагов:

1. Подключают радиационную панель и систему охлаждения установки по определению устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов, а также регистрирующие приборы к источникам электропитания и водоснабжения, соответственно.

2. Радиационную панель прогревают в течение (25 ± 5) мин от начала подключения к источнику электропитания.

3. Поднимают защитную заслонку радиационной панели, открывая доступ теплового потока к датчику для измерения плотности теплового потока.

4. Изменяя расстояние между радиационной панелью и датчиком для измерения теплового потока, устанавливают держатель образца на таком расстоянии от радиационной панели, при котором значение плотности теплового потока, падающего на пробу, равно 5000 Вт/м^2 .

5. Опускают заслонку и фиксируют расстояние от радиационной панели до держателя образца.

6. Устанавливают пакет материалов на держателе с помощью зажимов и устройства натяжения.

7. Поднимают защитную заслонку радиационной панели и выдерживают пакет материалов под действием теплового потока установленной плотности.

8. Измеряют плотность теплового потока и температуру на внутренней поверхности пакета.

9. Воздействие теплового потока продолжается до изменения температуры на внутренней поверхности образца на $50 \text{ }^\circ\text{C}$ от начального значения.

10. Регистрируют время, за которое температура на внутренней поверхности образца увеличилась на $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

11. Защитную заслонку радиационной панели опускают. Образец изымают из держателя.

Количество циклов механических, тепловых и влажно-тепловых воздействий ограничивалось снижением эксплуатационной устойчивости пакета к воздействию теплового потока до 100 секунд.

Экспериментальные исследования проводились в условиях аккредитованной лаборатории при научно-исследовательском центре Витебского областного управления МЧС.

Основные результаты экспериментальных исследований влияния многоцикловых воздействий основных эксплуатационных факторов на эксплуатационную устойчивость пакета материалов к воздействию теплового потока представлены на рисунке 5.5. Для повышения информативности полученных результатов на рисунке указан уровень соответствия устойчивости пакета к воздействию теплового потока нормативным требованиям (рис. 5.5, кривая 8, $Y = 240 \text{ с}$) [152].

Комплексный анализ результатов, представленных на рисунке 5.6, позволяет сделать следующие предварительные выводы [152, 153]:

– установлен закономерный характер снижения эксплуатационной устойчивости пакета материалов к воздействию теплового потока от количества циклов нагружения вне зависимости от вида фактора износа;

– для исследуемого состава пакета материалов наименьшее влияние на изменение эксплуатационной устойчивости пакета материалов оказывает фактор износа, состоящий только из стирки (рис. 5.5, кривая 1), а наибольшее – комплексное воздействие трех факторов износа: теплового воздействия, многократного изгиба и истирания, стирки (рис. 5.5, кривая 7);

– степень совместного влияния двух различных факторов износа на исследуемый показатель практически одинакова (рис. 5.5, кривые 4, 5, 6).

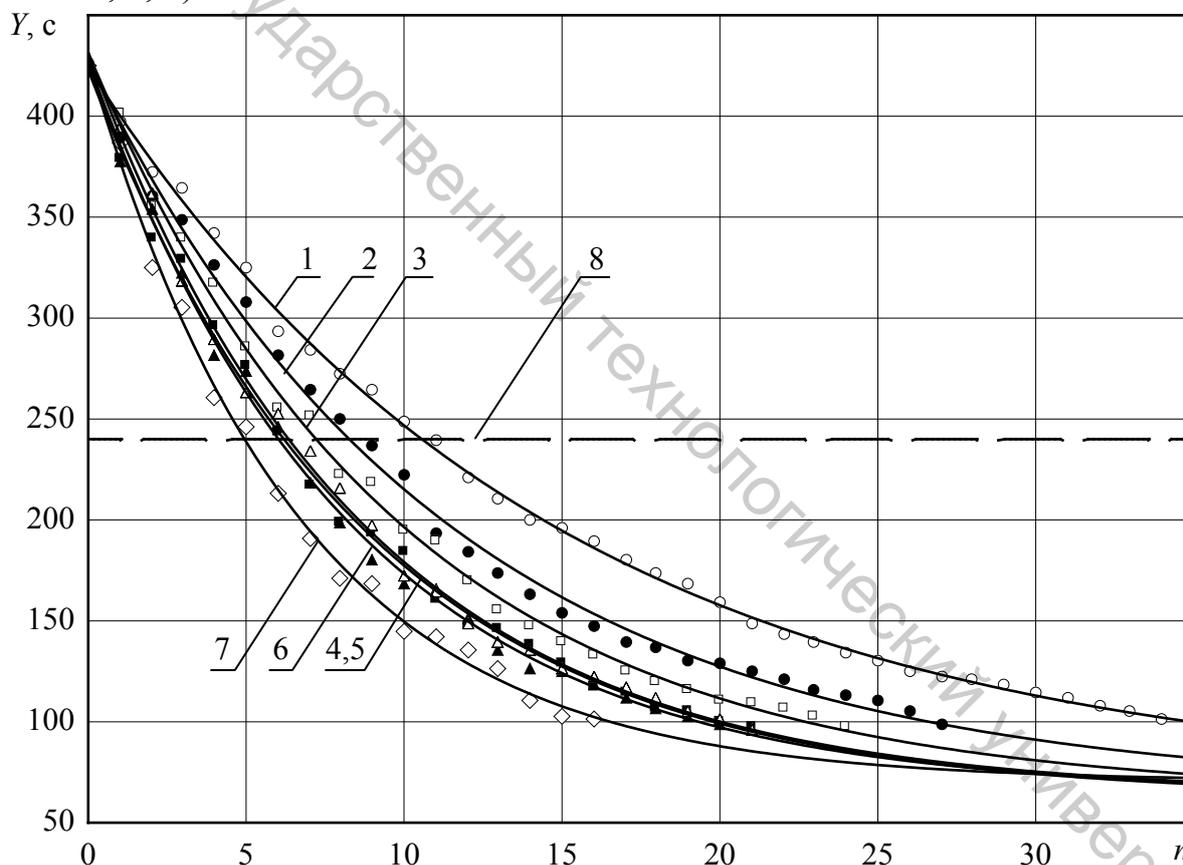


Рисунок 5.5 – Зависимость эксплуатационной устойчивости пакета материалов к воздействию теплового потока от количества циклов нагружения, моделирующих воздействие различных сочетаний факторов износа:

- 1 – стирка; 2 – многократный изгиб и истирание; 3 – тепловое воздействие;
 - 4 – тепловое воздействие, стирка; 5 – многократный изгиб и истирание, стирка;
 - 6 – тепловое воздействие, многократный изгиб и истирание;
 - 7 – тепловое воздействие, многократный изгиб и истирание, стирка;
 - 8 – уровень устойчивости пакета материалов к воздействию теплового потока, соответствующий нормативным требованиям
- – результаты моделирования; ○ – экспериментальные данные

Для оценки параметров разработанных математических моделей (5.5), (5.12) обработка результатов экспериментальных исследований производилась с использованием математического статистического пакета Statistica for Windows. Численные значения параметров вероятностных математических моделей (5.5) и моделей (5.12), полученных на основе применения принципа профессора Н. М. Седякина, при воздействии различных факторов износа представлены в таблицах 5.1, 5.2 [152].

Таблица 5.1 – Результаты математического моделирования процесса изменения эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов $Y(n)$ при многократном воздействии основных эксплуатационных факторов

Фактор износа	Параметры модели (5.5)				Коэффициент детерминации, R^2
	Y_0 , с	Y_p , с	M , цикл ⁻¹	d	
Стирка	424	67	0,068	0,99	0,998
Многократный изгиб и истирание	431	62	0,087	0,99	0,996
Тепловое воздействие	436	60	0,101	0,98	0,997
Многократный изгиб и истирание, стирка	427	60	0,111	1,01	0,997
Тепловое воздействие, стирка	434	62	0,118	0,96	0,996
Тепловое воздействие, многократный изгиб и истирание	433	61	0,12	0,97	0,997
Тепловое воздействие, многократный изгиб и истирание, стирка	428	68	0,149	1,0	0,996

Таблица 5.2 – Результаты математического моделирования процесса изменения эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов $Y(n)$ при многократном воздействии основных эксплуатационных факторов

Фактор износа	Параметры модели (5.12)			Коэффициент детерминации, R^2
	Y_0 , с	Y_p , с	M , цикл ⁻¹	
Стирка	424	68	0,069	0,999
Многократный изгиб и истирание	428	66	0,089	0,996
Тепловое воздействие	432	64	0,102	0,998
Многократный изгиб и истирание, стирка	423	62	0,114	0,996
Тепловое воздействие, стирка	431	64	0,116	0,997
Тепловое воздействие, многократный изгиб и истирание	428	65	0,121	0,997
Тепловое воздействие, многократный изгиб и истирание, стирка	428	70	0,151	0,998

Анализ результатов математического моделирования процесса ухудшения теплозащитных свойств пакета материалов БОП при циклическом нагружении различными факторами износа, представленных в таблицах 5.1, 5.2, позволяет отметить следующее [152]:

- математические модели (5.5), (5.12) адекватны результатам эксперимента с доверительной вероятностью 0,99 для многоцикловых воздействий исследованных факторов износа;

- численное значение параметра Y_p моделей (5.5), (5.12) для всех исследованных факторов износа не зависит от условий проведения многоциклового испытания, а определяется теплофизическими свойствами пакета материалов. В ходе дополнительных экспериментальных исследований установлено, что для всех факторов износа численные значения критической эксплуатационной устойчивости Y_p и устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов без верхнего слоя $Y_{б.в.}$ являются соизмеримыми величинами. Некоторый разброс данного показателя объясняется систематическими и случайными погрешностями при проведении экспериментальных исследований. Следовательно, при проведении дальнейших исследований по разработке экспресс-методов прогнозирования безопасного срока службы боевой одежды пожарных при эксплуатации можно принять следующее допущение $Y_p = Y_{б.в.}$;

- численное значение параметра Y_0 разработанных математических моделей (5.5), (5.12) при изменении действующего эксплуатационного фактора практически не изменяется, что свидетельствует о том, что данный параметр так же определяется теплофизическими свойствами материалов пакета;

- изменения значений параметра M моделей (5.5) и (5.12), соответственно, указывает на их зависимость от вида фактора износа. Численные значения параметра M моделей (5.5) и (5.12) пропорционально степени влияния фактора износа на изменение эксплуатационной устойчивости пакета материалов к воздействию теплового потока;

- для всех исследуемых эксплуатационных факторов численные значения параметра d модели (5.5) практически одинаковы и стремятся к 1. Данный факт указывает на стационарность рассматриваемого процесса изменения показателей эксплуатационных свойств пакета материалов БОП при многократном воздействии основных факторов износа.

На рисунке 5.6 представлена зависимость интенсивности процесса снижения эксплуатационной устойчивости материалов к воздействию теплового потока от количества циклов нагружения, моделирующих воздействие различных сочетаний факторов износа. Анализ представленных зависимостей позволяет провести ранжирование различных факторов износа по степени влияния на изменение эксплуатационных свойств боевой одежды пожарных. Наибольшее влияние оказывает комплексное воздействие трех факторов износа: теплового воздействия,

многократного изгиба и истирания, стирки, соответствующее максимальному значению $I_Y = 54,1$ [с цикл⁻¹] (рис. 5.7) [152].

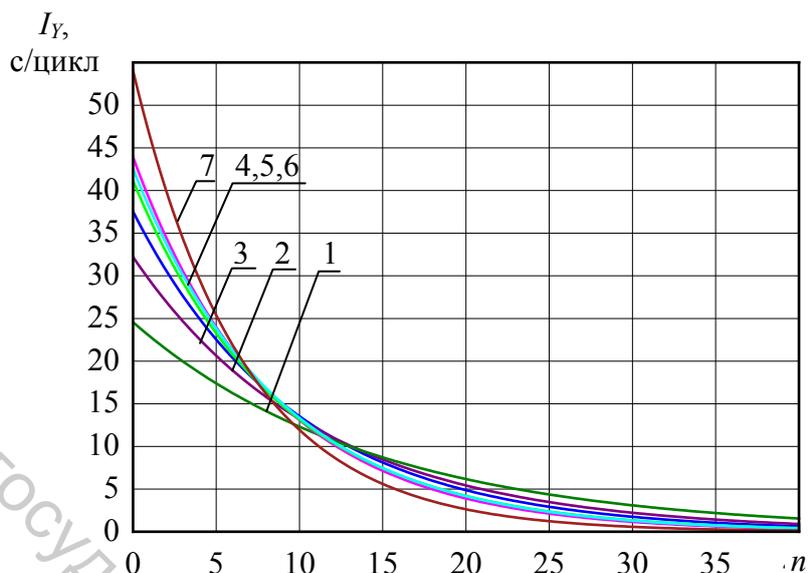


Рисунок 5.6 – Зависимость интенсивности процесса снижения эксплуатационной устойчивости материалов к воздействию теплового потока от количества циклов нагружения, моделирующих воздействие различных сочетаний факторов износа:

- 1 – стирка; 2 – многократный изгиб и истирание; 3 – тепловое воздействие;
- 4 – тепловое воздействие, стирка; 5 – многократный изгиб и истирание, стирка;
- 6 – тепловое воздействие, многократный изгиб и истирание;
- 7 – тепловое воздействие, многократный изгиб и истирание, стирка

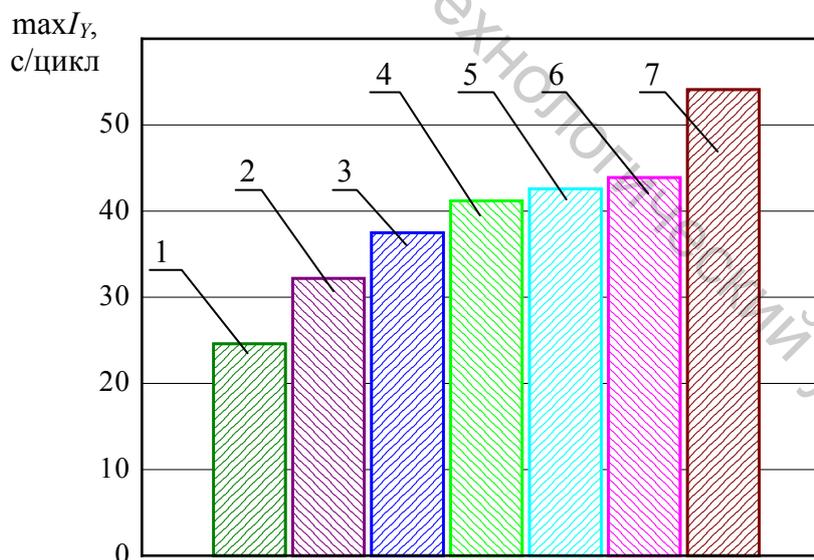


Рисунок 5.7 – Ранжирование факторов износа по степени влияния на эксплуатационную устойчивость пакета к воздействию теплового потока:

- 1 – стирка; 2 – многократный изгиб и истирание; 3 – тепловое воздействие;
- 4 – тепловое воздействие, стирка; 5 – многократный изгиб и истирание, стирка;
- 6 – тепловое воздействие, многократный изгиб и истирание;
- 7 – тепловое воздействие, многократный изгиб и истирание, стирка

Таким образом, в результате проведенного комплекса экспериментальных исследований установлена адекватность разработанных математических моделей экспериментальным данным. Произведен анализ влияния многоциклового воздействия основных эксплуатационных факторов на характер изменения устойчивости к воздействию теплового потока и параметры разработанных математических моделей для данного пакета материалов БОП.

Однако практическое использование разработанных математических моделей является затруднительным по причине значительных временных затрат по определению численного значения параметра нестационарности и, возможно, отсутствия математического статистического пакета Statistica for Windows. Вследствие этого возникает необходимость в разработке методики оценки параметров математической модели по результатам кратковременного эксперимента.

5.3 Экспресс-методика определения безопасного срока службы боевой одежды пожарных при эксплуатации

Производители современной боевой одежды пожарных, стоящей на вооружении подразделений МЧС Республики Беларусь, гарантируют ее соответствие требованиям действующего стандарта СТБ 1971-2009 «Система стандартов безопасности труда. Одежда пожарная боевая. Общие технические условия» [5] (Например, РПУП «Униформ», Декларация о соответствии № ВУ / 112 10.1 2Д 033 00034).

Но оценка и контроль изменения защитных свойств боевой одежды пожарных в процессе эксплуатации производится путем внешнего осмотра [5]. Масштабные эксплуатационные испытания по определению соответствия БОП нормативным требованиям проводятся крайне редко. Так как определение большинства нормативных физико-механических и теплофизических показателей материалов пакета БОП связано с повреждением или разрушением образца, а используемые при изготовлении защитной одежды материалы имеют высокую стоимость.

Разработка неразрушающих методов оценки безопасного срока службы БОП, как готового изделия, позволит выявить резервы их эксплуатационной надежности и, соответственно, снизить риск получения травмы при проведении аварийно-спасательных работ.

Как показано ранее в п. 5.2, установлена закономерность эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов и количества циклов воздействия основных факторов износа, параметры разработанных математических моделей (5.3), (5.12) имеют строго определенный физический смысл. Следовательно, используя

имитационную модель изменения эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов при циклическом воздействии основных эксплуатационных факторов, появляется возможность решения обратной задачи – определения количества циклов воздействия различных факторов износа, соответствующих сроку эксплуатации защитной одежды пожарных.

При прогнозировании безопасного срока службы боевой одежды пожарных при эксплуатации использование модели (5.12) является наиболее предпочтительным относительно вероятностных моделей, вследствие того, что параметры данной математической модели довольно легко определяются в результате непродолжительного эксперимента.

Как было отмечено выше, численные значения Y_p и устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов без верхнего слоя $Y_{б.в.}$ соизмеримыми, то параметры Y_0 и Y_p модели (5.12) легко определяются в ходе действующих кратковременных нормативных испытаний согласно [5]. Оценку темпового параметра M модели (5.12) рекомендуется производить посредством введения масштабной линеаризирующей функции и с дальнейшим определением параметра M методом наименьших квадратов.

С учетом вышеизложенного разработана методика определения безопасного срока службы боевой одежды пожарных, которая имеет ряд преимуществ:

- оценка безопасного срока службы не связана с повреждением или разрушением образца и может производиться как для проб пакета материалов, так и для готового изделия;
- оценка безопасного срока службы БОП производится в результате кратковременного эксперимента;
- используемое при оценке оборудование и средства измерения соответствуют СТБ 1971-2009 и имеются в наличии в аккредитованных лабораториях МЧС РБ.

Методика состоит из двух экспериментальных исследований: на основании результатов предварительных испытаний устанавливаются параметры математических моделей изменения эксплуатационной устойчивости БОП к воздействию теплового потока от многоциклового действия эксплуатационных факторов; на основании результатов второго (периодического) испытания даются рекомендации о возможности дальнейшей эксплуатации БОП и сроках ее безопасного использования.

В методике используются следующие термины и определения:

- *эффективный срок службы*: условный срок службы, выраженный числом циклов эксплуатации, в течение которого БОП соответствует нормативным требованиям по устойчивости к воздействию теплового потока;

– *цикл эксплуатации*: совокупность лабораторных процессов нагружения материалов БОП, параметры которых соответствуют реальным условиям эксплуатации;

– *цикл интенсивной эксплуатации*: процесс лабораторного нагружения материалов боевой одежды пожарных, состоящий из механических, тепловых воздействий, химчистки или стирки;

– *цикл умеренной эксплуатации*: процесс лабораторного нагружения материалов боевой одежды пожарных, состоящий из химчистки или стирки;

– *безопасный срок службы*: срок службы, выраженный числом месяцев эксплуатации, в течение которого боевая одежда пожарных соответствует нормативным требованиям по устойчивости к воздействию теплового потока и по достижении которого должна быть передана для повторного исследования.

Предварительные испытания

1. Отбор и подготовка образцов пакета материалов БОП. Все материалы перед испытаниями должны быть выдержаны в климатических условиях по ГОСТ 10681.

2. Определение Y_0 – начальной эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов БОП согласно СТБ 1971-2009 (приложение А) со следующими дополнениями: значение плотности теплового потока, падающего на пакет материалов, равно 5000 Вт/м^2 ; воздействие теплового потока продолжается до изменения температуры на внутренней поверхности образца на $50 \text{ }^\circ\text{C}$ от начального значения.

3. Определение $Y_{б.в.}$ – эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового излучения пакета материалов БОП без верхнего слоя согласно СТБ 1971-2009 (приложение А) со следующими дополнениями: значение плотности теплового потока, падающего на пакет материалов, равно 5000 Вт/м^2 ; воздействие теплового потока продолжается до изменения температуры на внутренней поверхности образца на $50 \text{ }^\circ\text{C}$ от начального значения.

4. Воздействие на пакет материалов БОП несколькими циклами (до трех циклов) умеренной эксплуатации.

5. Воздействие на пакет материалов БОП несколькими циклами (до трех циклов) интенсивной эксплуатации.

6. Определение эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов БОП после каждого из циклов интенсивной ($Y_{i,\text{min}}$) и умеренной эксплуатации ($Y_{i,\text{max}}$).

7. Определение темповых показателей изменения эксплуатационной устойчивости материалов БОП к воздействию теплового потока при воздействии циклов интенсивной и умеренной эксплуатации.

$$D_{i,\max} = \ln\left(\frac{Y_0 - Y_{\text{б.в.}}}{Y_{i,\max} - Y_{\text{б.в.}}}\right), H_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n D_{i,\max}}{\sum_{i=1}^n n_i},$$

$$D_{i,\min} = \ln\left(\frac{Y_0 - Y_{\text{б.в.}}}{Y_{i,\min} - Y_{\text{б.в.}}}\right), H_{\min} = \frac{\sum_{i=1}^n D_{i,\min}}{\sum_{i=1}^n n_i},$$

где H_{\max} – темповой показатель, характеризующий скорость изменения эксплуатационной устойчивости материалов БОП к воздействию теплового потока при умеренной эксплуатации, цикл^{-1} ; H_{\min} – темповой показатель, характеризующий скорость изменения эксплуатационной устойчивости материалов БОП к воздействию теплового потока при интенсивной эксплуатации, цикл^{-1} ; n – общее количество циклов лабораторного нагружения пакета материалов; n_i – текущее количество циклов лабораторного нагружения пакета материалов.

8. Определение количества циклов интенсивной и умеренной эксплуатации, в течение которых боевая одежда пожарных соответствует нормативным требованиям по устойчивости к воздействию теплового потока:

$$N_{\max} = \frac{1}{H_{\max}} \cdot \ln\left(\frac{Y_0 - Y_{\text{б.в.}}}{240 - Y_{\text{б.в.}}}\right); N_{\min} = \frac{1}{H_{\min}} \cdot \ln\left(\frac{Y_0 - Y_{\text{б.в.}}}{240 - Y_{\text{б.в.}}}\right),$$

где N_{\min} – количество циклов интенсивной эксплуатации, в течение которых боевая одежда пожарных соответствует нормативным требованиям по устойчивости к воздействию теплового потока; N_{\max} – количество циклов умеренной эксплуатации, в течение которых боевая одежда пожарных соответствует нормативным требованиям по устойчивости к воздействию теплового потока.

Периодические испытания

9. Подготовка БОП к исследованию. Перед испытаниями она должна быть выдержана в климатических условиях по ГОСТ 10681.

10. Определение Y – эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока БОП согласно СТБ 1971-2009 (приложение А) со следующими дополнениями: значение плотности теплового потока, падающего на пакет материалов, равно 5000 Вт/м^2 ; воздействие теплового потока продолжается до изменения температуры на внутренней

поверхности образца на 50 °С от начального значения.

11. Оценка эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока БОП по сравнению с нормативными требованиями ($Y_{\text{норм}} = 240$ с). Если $Y < Y_{\text{норм}}$, то указывается на несоответствии БОП требованиям СТБ 1971-2009 и невозможности ее дальнейшей безопасной эксплуатации. Если $Y \geq Y_{\text{норм}}$, то указывается о соответствии БОП требованиям СТБ 1971-2009 и далее производится оценка срока ее безопасного использования до повторного исследования.

12. Определение количества циклов умеренной и интенсивной эксплуатации, соответствующих комплексу реальных эксплуатационных воздействий на БОП за данный период использования:

$$n_{\text{max}} = \frac{1}{H_{\text{max}}} \cdot \ln\left(\frac{Y_0 - Y_{\text{б.в.}}}{Y - Y_{\text{б.в.}}}\right); n_{\text{min}} = \frac{1}{H_{\text{min}}} \cdot \ln\left(\frac{Y_0 - Y_{\text{б.в.}}}{Y - Y_{\text{б.в.}}}\right),$$

где n_{min} – количество циклов интенсивной эксплуатации, соответствующих комплексу реальных эксплуатационных воздействий на БОП за данный период использования; n_{max} – количество циклов умеренной эксплуатации, соответствующих комплексу реальных эксплуатационных воздействий на БОП за данный период использования.

13. Определение максимального и минимального срока безопасной службы БОП до повторного исследования:

$$P_{\text{max}} = \frac{(N_{\text{max}} - n_{\text{max}})}{f}; P_{\text{min}} = \frac{(N_{\text{min}} - n_{\text{min}})}{f},$$

где P_{max} – максимальный срок безопасной службы БОП до повторного исследования, месяцев; P_{min} – минимальный срок безопасной службы БОП до повторного исследования, месяцев; f – периодичность стирок в месяц (рекомендуется 1 раз месяц).

5.4 Типовой расчет безопасного срока службы боевой одежды пожарных при эксплуатации

Для проведения расчета безопасного срока службы защитной одежды пожарных была выбрана боевая одежда пожарных для подразделений МЧС РБ, которая на момент исследования эксплуатировалась в течение 1 года. Боевая одежда пожарных была изготовлена из материала верха совмещенного с водонепроницаемым слоем: ткань из

термостойкого синтетического волокна «Арселон-С», саржевого переплетения, поверхностная плотность $223 \pm 11 \text{ г/м}^2$ с нанесенным мембранным полиуретановым покрытием ТУ 80005044.003-2012; теплоизоляционной подстежки: нетканое холстопршивное полотно (полиэфир 50 %, арселон 50 %), поверхностная плотность 300 г/м^2 , ТУ ВУ 200352162.004-2010; подкладочной ткани: полиэфирная ткань полотняного переплетения, поверхностная плотность 80 г/м^2 .

Предварительные испытания

Во время предварительного этапа исследовался ранее не подвергавшийся эксплуатационным воздействиям пакет материалов, состав которого указан выше.

1. Все материалы перед испытаниями были выдержаны в климатических условиях по ГОСТ 10681.

2. Оценка начальной эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов БОП Y_0 :

$$Y_0 = 425 \text{ с.}$$

3. Оценка эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового излучения пакета материалов БОП без верхнего слоя $Y_{б.в.}$:

$$Y_{б.в.} = 69 \text{ с.}$$

4. Воздействие на пакет материалов одним циклом умеренной эксплуатации.

5. Воздействие на пакет материалов одним циклом интенсивной эксплуатации.

6. Оценка эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов боевой одежды пожарных после каждого из циклов интенсивной ($Y_{i,\min}$) и умеренной эксплуатации ($Y_{i,\max}$). Результаты сведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Эксплуатационная устойчивость к воздействию теплового потока пакета материалов БОП после циклов интенсивной и умеренной эксплуатации

n_i	$Y_{i,\max}, \text{ с}$	$Y_{i,\min}, \text{ с}$
1	398	387
2	372	325
3	365	305

7. Расчет темповых показателей изменения эксплуатационной устойчивости материалов БОП к воздействию теплового потока при воздействии циклов интенсивной (H_{\min}) и умеренной (H_{\max}) эксплуата-

ЦИИ:

$$D_{1,\max} = \ln\left(\frac{Y_0 - Y_{\text{б.в.}}}{Y_{1,\max} - Y_{\text{б.в.}}}\right) = \ln\left(\frac{425 - 69}{398 - 69}\right) = 0,161;$$

$$D_{2,\max} = \ln\left(\frac{Y_0 - Y_{\text{б.в.}}}{Y_{2,\max} - Y_{\text{б.в.}}}\right) = \ln\left(\frac{425 - 69}{372 - 69}\right) = 0,079;$$

$$D_{3,\max} = \ln\left(\frac{Y_0 - Y_{\text{б.в.}}}{Y_{3,\max} - Y_{\text{б.в.}}}\right) = \ln\left(\frac{425 - 69}{365 - 69}\right) = 0,185;$$

$$H_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n D_{i,\max}}{\sum_{i=1}^n n_i} = \frac{0,161 + 0,079 + 0,185}{1 + 2 + 3} = 0,071 \text{ цикл}^{-1};$$

$$D_{1,\min} = \ln\left(\frac{Y_0 - Y_{\text{б.в.}}}{Y_{1,\min} - Y_{\text{б.в.}}}\right) = \ln\left(\frac{425 - 69}{387 - 69}\right) = 0,113;$$

$$D_{2,\min} = \ln\left(\frac{Y_0 - Y_{\text{б.в.}}}{Y_{2,\min} - Y_{\text{б.в.}}}\right) = \ln\left(\frac{425 - 69}{325 - 69}\right) = 0,33;$$

$$D_{3,\min} = \ln\left(\frac{Y_0 - Y_{\text{б.в.}}}{Y_{3,\min} - Y_{\text{б.в.}}}\right) = \ln\left(\frac{425 - 69}{305 - 69}\right) = 0,411;$$

$$H_{\min} = \frac{\sum_{i=1}^n D_{i,\min}}{\sum_{i=1}^n n_i} = \frac{0,113 + 0,33 + 0,411}{1 + 2 + 3} = 0,142 \text{ цикл}^{-1}.$$

8. Расчет количества циклов интенсивной (N_{\min}) и умеренной (N_{\max}) эксплуатации, в течение которых боевая одежда пожарных соответствует нормативным требованиям по устойчивости к воздействию теплового потока:

$$N_{\max} = \frac{1}{H_{\max}} \cdot \ln\left(\frac{Y_0 - Y_{\text{б.в.}}}{240 - Y_{\text{б.в.}}}\right) = \frac{1}{0,071} \cdot \ln\left(\frac{425 - 69}{240 - 69}\right) \approx 10 \text{ циклов};$$

$$N_{\min} = \frac{1}{H_{\min}} \cdot \ln\left(\frac{Y_0 - Y_{\text{б.в.}}}{240 - Y_{\text{б.в.}}}\right) = \frac{1}{0,142} \cdot \ln\left(\frac{425 - 69}{240 - 69}\right) \approx 5 \text{ циклов.}$$

Периодические испытания

9. Исследуемая боевая одежда пожарных перед испытаниями была выдержана в климатических условиях по ГОСТ 10681.

10. Оценка эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока:

$$Y = 325 \text{ с.}$$

Так как $Y \geq Y_{\text{норм}} = 240 \text{ с}$, то БОП соответствует требованиям СТБ 1971-2009.

11. Расчет количества циклов умеренной (n_{\max}) и интенсивной (n_{\min}) эксплуатации, во время которых БОП соответствует нормативным требованиям по устойчивости к воздействию теплового потока:

$$n_{\max} = \frac{1}{H_{\max}} \cdot \ln\left(\frac{Y_0 - Y_{\text{б.в.}}}{Y - Y_{\text{б.в.}}}\right) = \frac{1}{0,071} \cdot \ln\left(\frac{425 - 69}{325 - 69}\right) \approx 5 \text{ циклов ;}$$

$$n_{\min} = \frac{1}{H_{\min}} \cdot \ln\left(\frac{Y_0 - Y_{\text{б.в.}}}{Y - Y_{\text{б.в.}}}\right) = \frac{1}{0,142} \cdot \ln\left(\frac{425 - 69}{324 - 69}\right) \approx 2 \text{ циклов.}$$

12. Расчет срока максимального (Π_{\max}) и минимального (Π_{\min}) срока безопасной службы БОП до повторного исследования:

$$\Pi_{\max} = \frac{(N_{\max} - n_{\max})}{f} = \frac{(10 - 5)}{1} = 5 \text{ месяцев ;}$$

$$\Pi_{\min} = \frac{(N_{\min} - n_{\min})}{f} = \frac{(5 - 2)}{1} = 3 \text{ месяца.}$$

На основании проведённого расчета можно сделать следующие выводы:

1. Исследованная боевая одежда пожарных после годовой эксплуатации соответствует нормативным требованиям СТБ 1971-2009 по устойчивости к воздействию теплового потока.

2. Рекомендовать данную боевую одежду пожарных к повторным испытаниям не ранее, чем через 5–3 месяцев.

РЕЗЮМЕ

1. Введен и обоснован комплекс показателей, характеризующих эксплуатационные свойства боевой одежды пожарных. Получены экспериментальные зависимости, описывающие влияние количества циклов нагружения различными факторами износа на показатели эксплуатационных свойств боевой одежды пожарных. Разработаны математические модели зависимости эксплуатационной устойчивости пакета материалов БОП к тепловому воздействию от количества циклов нагружения основными факторами износа, позволяющие осуществить прогнозирование технического состояния боевой одежды пожарных в процессе её эксплуатации.

2. Установлено, что математические модели взаимосвязи эксплуатационной устойчивости пакета материалов и количества циклов нагружения адекватны результатам эксперимента, численные значения коэффициента детерминации для всех факторов износа равны 0,99. Отмечено, что численные значения начальной Y_0 и установившейся Y_p эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета для всех исследованных факторов износа не зависят от условий проведения многоциклового испытания, а определяются теплофизическими свойствами материалов. Сравнительный анализ численных значений установившейся эксплуатационной устойчивости Y_p и эксплуатационной устойчивости к воздействию теплового потока пакета без учета верхнего слоя $Y_{б.в}$ указывает на то, что для всех факторов износа данные показатели являются соизмеримыми.

3. Проведен анализ интенсивности процесса изменения эксплуатационной устойчивости пакета материалов боевой одежды пожарных при многократном воздействии основных факторов износа, что позволило осуществить ранжирование факторов износа по степени влияния на показатели эксплуатационных свойств боевой одежды пожарных. Показано, что наибольшее влияние оказывает комплексное воздействие трех факторов износа: теплового воздействия, многократного изгиба и истирания, стирки.

4. По результатам проведённых исследований разработана экспресс-методика определения безопасного срока службы боевой одежды пожарных, которая реализуется без повреждения или разрушения образца и может применяться как для пакета материалов, так и для готового изделия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Впервые разработан аналитический метод расчёта температурных полей в многослойном пакете материалов с учётом зависимости показателей теплофизических свойств материалов от температуры при тепловом воздействии в процессе проведения нормативных испытаний, позволяющий на стадии проектирования состава пакета материалов для боевой одежды пожарных (БОП) осуществить их научно обоснованный выбор.

2. Обоснован комплекс показателей, характеризующих теплозащитные свойства пакета материалов БОП, и по результатам математического моделирования и экспериментальных исследований получена математическая зависимость времени безопасной эксплуатации боевой одежды пожарных от плотности теплового воздействия, использование которой позволяет совершенствовать систему оценки технического состояния защитной одежды пожарных.

3. На основании полученных экспериментальных зависимостей температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета при многоцикловом тепловом воздействии разработаны математические зависимости для прогнозирования максимальной температуры и плотности теплового потока на внутренней поверхности пакета при испытаниях на устойчивость к многократному тепловому воздействию и методологический подход к исследованию влияния многоцикловых тепловых нагрузок на показатели теплофизических свойств пакетов материалов БОП.

4. Введен комплекс показателей, характеризующих изменение теплозащитных свойств боевой одежды пожарных при эксплуатации, и получены математические зависимости эксплуатационной устойчивости пакета материалов БОП к тепловому воздействию от количества циклов нагружения основными факторами износа, которые дают возможность осуществить прогнозирование безопасного срока службы защитной одежды пожарных. На основании полученных математических зависимостей проведено ранжирование факторов износа по степени их влияния на показатели эксплуатационных свойств боевой одежды пожарных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логинов, В. И. Конструирование и комплексная оценка качества специальной защитной одежды пожарных : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.26.03 / В. И. Логинов ; Всерос. науч.-исслед. ин-т противопожар. обороны. – М., 2010. – 48 с.

2. Давыдов, А. Ф. Исследование стойкости тканей для пошива специальной одежды / А. Ф. Давыдов, О. О. Юрцев // Изв. ВУЗов. Технология текстильной промышленности. – 2011. – № 5. – С. 10–12.

3. Создание защитной одежды для спасателей МЧС России / Л. Г. Одинцов [и др.] // Технология гражданской безопасности. – 2007. – Т. 3. – № 1. – С. 74–78.

4. Поповский, Д. В. Боевая одежда и снаряжение пожарного : метод. пособие / Д. В. Поповский, В. Ю. Охломенко : под ред. В. А. Грачева. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2004. – 86 с.

5. ССБТ. Одежда пожарных боевая. Общие технические условия: СТБ 1971-2009. – Введ. 01.01.2010 (с отменой на территории РБ НПБ 29-2000). – Минск : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2009. – 36 с.

6. Боевая одежда пожарных [Электронный ресурс] // ARSELON withstanding fiber. – Режим доступа: <http://www.arselon.by/rus/produc/milform/>. – Дата доступа: 15.03.2012.

7. Тканый материал для использования в защитной одежде и защитная одежда улучшенного комфорта : пат. RU 2098527 / Б. Д. Болига, Д. Э. Хоффман. – Оpubл. 10.12.1997.

8. Тканый материал для использования в защитной одежде и защитная одежда улучшенного комфорта : пат. ВУ 2384 / Б. Д. Болига, Д. Э. Хоффман. – Оpubл. 30.09.1998.

9. Тканый термостойкий материал для защитной одежды и защитная одежда : пат. ВУ 4086 / В. П. Астапов, Ю. Г. Русецкий, С. А. Нацевский. – Оpubл. 30.09.2001.

10. Русецкий, Ю. Г. Технология получения огнетермостойкой пряжи и тканей специального назначения : дис. ... канд. техн. наук : 05.19.02 / Ю. Г. Русецкий. – Витебск, 2002. – 281 л.

11. Дмитракович, Н. М. Термостойкие ткани для производства материала верха специальной защитной одежды от повышенных тепловых воздействий / Н. М. Дмитракович, Ю. Г. Русецкий, В. И. Ольшанский // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация : материалы Междунар. науч.-прак. конф., Минск, 7–9 июня 2005 г. : в 3 ч. / Учреж. «НИИ пож. безоп. и проб. ЧС МЧС Респ. Беларусь» ; редкол.: Э.Р. Бариев [и др.]. – Минск, 2005. – Ч. 3. – С. 86–88.

12. Soil resistant cleanable clothing [Electronic resource] : pat. EP 1143062A1 / S. Schwarz, P. Matusche, W. Stübinger. – Publ. date

10.10.2001. – Mode of access: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/76940655b32728a65ad9/EP1143062A1.pdf>. – Date of access: 20.12.2015.

13. Термостойкий слоистый материал для защитной одежды : пат. ВУ 3532 / С. А. Нацевский, М. Е Липатов. – Оpubл. 30.09.2001.

14. Продукция РПУП «Униформ» [Электронный ресурс] // Официальный сайт Республиканского производственного унитарного предприятия «Униформ». – Режим доступа: <http://uniformmchs.by/production/>. – Дата доступа: 15.01.2014.

15. Нетканые технологии для пожарных и военнослужащих [Электронный ресурс] // Новые химические технологии. Аналитический портал химической промышленности // Режим доступа: http://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=3908. – Дата доступа: 31.01.2012.

16. Боевая одежда пожарного. Общие технические требования. Методы испытаний: НПБ РФ 157-99. – Введ. 12.08.99. – М. : ГУГПС МВД России, 1999. – 20 с.

17. Protective clothing for firefighters. Performance requirements for protective clothing for firefighting : BS EN 469: 2005. – Brussel : European Committee for Standardization, 2006. – 52 p.

18. Standard on protective ensembles for structural fire fighting and proximity fire fighting, 2013 Edition : NFPA 1971. – Quincy, MA : National Fire Protection Association, 2013. – 145 p.

19. Stoll, A. M. Method and rating system for evaluation of thermal protection / A. M. Stoll, M. A. Chianta // Aerospace Medicine. – 1969. – Vol. 40, № 11. – P. 1232–1238.

20. Stoll, A. M. Heat transfer through fabrics as related to thermal injury / A. M. Stoll, M. A. Chianta // Transactions-New York Academy of Sciences. – 1971. – Vol. 33, № 7. – P. 649–670.

21. Stoll, A. M. Burn production and prevention in convective and radiant heat transfer / A. M. Stoll, M. A. Chianta // Aerospace Medicine. – 1968. – Vol. 39, № 10. – P. 1097–1100.

22. Standard on protective clothing and equipment for wildland fire fighting, 2011 Edition : NFPA 1977. – Quincy, MA : National Fire Protection Association, 2011. – 67 p.

23. ССБТ. Одежда специальная для защиты от термических рисков электрической дуги. Общие технические требования и методы испытаний: ГОСТ Р 12.4.234-2007. – Введ. 01.07.2008. – М. : Стандартинформ, 2007. – 27 с.

24. Gagnon, B. D. Evaluation of new test methods for fire fighting clothing [Electronic resource] : thes. submitted for the degree of Master of Science / B. D. Gagnon ; Worcester Polytechnic Institute – Worcester, 2000. – 150 p. – Mode of access: <http://www.wpi.edu/Pubs/ETD/Available/etd-0418100-155520/unrestricted/gagnon.pdf>. – Date of access: 19.09.2012.

25. Ezekoye, O. A. A model for assessing ignition, flame spread, and burn hazard potential of a multilayered jacket / O. A. Ezekoye, K. R. Diller // *Journal of Burn Care & Research*. – 2006. – Vol. 27, № 4. – P. 487–495.

26. Mercer, G. N. Mathematical modelling of the effect of fire exposure on a new type of protective clothing / G. N. Mercer, H. S. Sidhu // *ANZIAM Journal*. – 2008. – Vol. 49, № 1 – P. 289–305.

27. Lee, Y. M. Thermal protective performance of heat-resistant fabrics in various high intensity heat exposures / Y. M. Lee, R. L. Barker // *Textile Research Journal*. – 1987. – Vol. 57, № 3 – P. 123–132.

28. Barker, R. L. Analyzing the transient thermophysical properties of heat-resistant fabrics in TPP exposures / R. L. Barker, Y. M. Lee // *Textile Research Journal*. – 1987. – Vol. 57, № 6 – P. 331–338.

29. Лаврентьева, Е. П. Разработка научных основ и технологий производства текстильных материалов новых структур для специальной одежды и средств индивидуальной защиты : дис. ... д-ра техн. наук : 05.19.02 / Е. П. Лаврентьева. – М., 2016. – 413 л.

30. Protective clothing against heat and flame – Test method for complete garments – Prediction of burn injury using an instrumented manikin : ISO 13506:2008. – Brussel : European Committee for Standardization, 2008. – 26 p.

31. Техника пожарная. Специальная защитная одежда пожарного. Общие технические требования. Методы испытаний : ГОСТ Р 53264-2009. – Введ. 01.05.2009. – М. : Стандартинформ, 2009. – 42 с.

32. Slater, K. The progressive deterioration of textile materials. I: Characteristics of degradation // K. Slater / *Journal of the Textile Institute*. – 1986. – Vol. 77, № 2. – P. 76–87.

33. Костин, С. Л. Разработка методов технического контроля структурных параметров тканых полотен : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.19.02 / С. Л. Костин ; Иван. гос. текстил. акад. – Иваново, 2004. – 20 с.

34. Сташева, М. А. Разработка экспресс-метода компьютерного измерения показателей заполнения и пористости ткани / М. А. Сташева, Н. А. Коробов, Б. Н. Гусев // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. – 2002. – № 3. – С. 17–19.

35. Определение поверхностной плотности тканей / М. А. Сташева [и др.] // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. – 2003. – № 5. – С. 119–121.

36. Method and apparatus for checking and testing the characteristics of intervention clothes, in particular for firemen [Electronic resource] : pat. EP1122538 A2 / H. Mumelter, R. Bolognini. – Publ. date 08.08.2001. – Mode of access: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/6a9322875a895733af40/EP1122538A3.pdf>. – Date of access: 25.10.2015.

37. Thorpe, P. Development of non-destructive test methods for assessment of in-use fire fighter's protective clothing [Electronic resource] : thes. submitted for the degree of Master of Science / P. Thorpe, University of Saskatchewan. – Saskatoon, 2004. – 145 p. – Mode of access: <http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk3/SSU/TC-SSU-05202004155351.pdf>. Date of access: 25.11.2012.

38. Лебедева, Н. П. Влияние эксплуатационных воздействий на свойства параарамидных нитей технического назначения : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.19.01 / Н. П. Лебедева : С.-Петербург. гос. ун-т технологии и дизайна. – СПб., 2007. – 16 с.

39. Способ оценки теплозащитных свойств тканей и пакетов тканей : пат. RU 2012875 / Г. Г. Спирин, Л. А. Лаушкина, Ю. В. Логинов, В. Л. Молоков. – Опубл. 15.05.1994.

40. Способ определения теплозащитных свойств материалов и пакетов одежды : пат. RU 252731 / М. А. Чижик, Е. Ю. Долгова, Т. М. Иванцова. – Опубл. 27.08.2014.

41. Бессонова, Н. Г. Разработка методов и исследование теплофизических свойств текстильных материалов и пакетов при действии влаги и давления : дис. ... канд. техн. наук : 05.19.01 / Н. Г. Бессонова. – М., 2005. – 151 л.

42. Effects of Clothing Material on Thermoregulatory Responses / P. Zhang [et al.] // Textile Research Journal. – 2002. – Vol. 72, № 1. – P. 83–89.

43. Holcombe, B. V. Dry heat transfer characteristics of underwear fabrics / B. V. Holcombe, B. N. Hoschke // Textile Research Journal. – 1983. – Vol. 53, № 6. – P. 368–374.

44. Obendorf, S. K. Heat transfer characteristics of nonwoven insulating materials / S. K. Obendorf, J. P. Smith // Journal of the Textile Institute. – 1986. – Vol. 56, № 11. – P. 691–696.

45. Влияние стирки на тепловые свойства пакетов теплозащитной одежды / Л. Т. Бахшиева [и др.] // Швейная промышленность. – 2004. – № 1. – С. 45–46.

46. Kutlu, B. Thermal analysis and performance properties of thermal protective clothing / B. Kutlu, A. Cireli // Fibres & Textiles in Eastern Europe. – 2005. – Vol. 13, № 3 (51). – P. 58–62.

47. Дресвянина, Е. Н. Влияние эксплуатационных воздействий на свойства высокотермостойких полиоксадиазольных нитей арселон, арселон-С : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.19.01 / Е. Н. Дресвянина : С.-Петербург. гос. ун-т технологии и дизайна. – СПб., 2008. – 16 с.

48. Дресвянина, Е. Н. Высокотермостойкие полиоксадиазольные волокна и нити арселон, арселон-С: свойства и применение / Е. Н. Дресвянина // Дизайн. Материалы. Технология. – 2008. – № 1 (4). – С. 53–58.

49. Михалко, М. Н. Повышение кислородного индекса и устойчивости к воздействию светопогоды полиоксадиазольных волокон / М. Н. Михалко, В. В. Садовский, В. Н. Докучаев // Чрезвычайные ситуации : предупреждения и ликвидация. – 2004. – № 6(16). – С. 200–209.

50. Кукин, Г. К. Текстильное материаловедение (волокна и нити) / Г. К. Кукин, А. Н. Соловьев, А. И. Кобляков. – М. : Легпромбытиздат, 1989. – 271 с.

51. Experimental and theoretical research of thermophysical properties of systems of metal-coated textile materials / M.M. Dzmitrakovich [et al.] // Nonequilibrium processes in combustion and plasma based technologies: original abstracts of lectures presented at International Workshop, Minsk, 21 – 26 aug. 2004 / A.V. Luikov heat and mass transfer institute; editorial board: E.A. Matveichik [etc.]. – Minsk, 2004. – P. 154–156.

52. Теоретические исследования теплопереноса в условиях свободной конвекции для металлизированных текстильных материалов / Н. М. Дмитракович [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидации. – 2004. – № 6 (16). – С. 22–26.

53. Дмитракович, Н. М. Огнетермостойкий материал на тканой основе рапельного способа формирования для защитной одежды пожарных-спасателей : дис. ... канд. техн. наук : 05.26.02, 05.19.02 / Н.М. Дмитракович. – Витебск, 2009. – 267 л.

54. Mell, W. E. A Heat transfer model for firefighters' protective clothing / W. E. Mell, J. R. Lawson // Fire Technology. – 2000. – Vol. 36, № 1. – P. 39–68.

55. Chitrphiromsri, P. Modeling of thermal performance of firefighter protective clothing during the intense heat exposure [Electronic resource] : thes. submitted for the degree of Doctor of Philosophy / P. Chitrphiromsri, North Carolina State University. – Raleigh, 2004. – 150 p. – Mode of access: <http://repository.lib.ncsu.edu/ir/bitstream/1840.16/4307/1/etd.pdf>. – Date of access: 25.11.2012.

56. Михеев, М. И. Основы теплопередачи / М. И. Михеев, И. М. Михеева. – 2-е изд. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.

57. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 600 с.

58. Лыков, А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах / А. В. Лыков. – М. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954. – 298 с.

59. Установка и метод исследования теплозащитных характеристик текстильных материалов в вакууме / Л. А. Онищенко [и др.] // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 1982. – № 5. – С. 19–22.

60. Martin, J. R. Measurement of thermal conductivity of nonwovens using a dynamic method / J. R. Martin, G. E. R. Lamb // Textile Research Journal. – 1987. – Vol. 57, № 12. – P. 721–727.

61. Farnwort, B. Mechanism of heat flow through clothing insulation / B. Farnwort // Textile Research Journal. – 1983. – Vol. 53, № 12. – P. 111–125.

62. Woo, S. S. Heat and moisture transfer through nonwoven fabrics. Part i/ S. S. Woo, I. Shalev, R. L. Barker // Textile Research Journal. – 1994. – Vol. 64, № 3. – P. 149–162.

63. Comparing dynamic and static methods for measuring thermal conductive properties of textiles / O. Jirsak [et al.] // Textile Research Journal. – 1998. – Vol. 68, № 1. – P. 47–56.

64. Дульнев, Г. Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов / Г. Н. Дульнев, Ю. Г. Заричняк. – М. : Энергия, 1974. – 214 с.

65. Филимонов, С. С. Теплообмен в многослойных и пористых теплоизоляциях / С. С. Филимонов, Б. А. Хрусталева, К. М. Мазилии. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 184 с.

66. Корнюхин, И. П. Тепломассообмен в пористых телах : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.05 / И. П. Корнюхин ; Энергетич. ин-т. – М., 1991. – 31 с.

67. Infrared absorption studies of fabrics / W. W. Carr [et al.] // Textile Research Journal. – 1997. – Vol. 67, № 10. – P. 725–738.

68. Янкелевич, В. И. Расчет теплового сопротивления воздушных прослоек в воздухопроницаемой одежде / В. И. Янкелевич // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1971. – № 2. – С. 111–115.

69. Янкелевич, В. И. Перенос тепла через воздухопроницаемые материалы / В. И. Янкелевич // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1971. – № 1. – С. 104–108.

70. Кармина, К. В. Исследование влияния микропрослоек воздуха на теплозащитные свойства пакетов материалов для одежды / К. В. Кармина // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 1971. – № 3. – С. 26–32.

71. Афанасьева, Р. Ф. Гигиенические основы проектирования одежды для защиты от холода / Р. Ф. Афанасьева. – М. : Легкая индустрия, 1977. – 136 с.

72. Делль, Р. А. Гигиена одежды / Р. А. Делль, Р. Ф. Афанасьева, З. С. Чубарова. – М. : Легпромбытиздат, 1991. – 160 с.

73. Колесников, П. А. Основы проектирования теплозащитной одежды / П. А. Колесников. – М. : Легкая индустрия, 1971. – 112 с.

74. Шалмина, И. И. Расчет толщины теплоизоляционного слоя спецодежды для холодильных камер / И. И. Шалмина, В. С. Салтыкова, А. А. Захарова // Швейная промышленность. – 1992. – № 6. – С. 34–35.

75. Тепломассообменные свойства материалов для теплозащитной одежды / И. И. Шалмина [и др.] // Швейная промышленность. – 1992. – № 4. – С. 40–42.

76. Effects of moisture and fiber type on infrared absorption of fabrics / E. G. McFarkmd [et al.] // Textile Research Journal. – 1999. – Vol. 69, № 8. – P. 607–615.

77. Ганин, Е. А. Физическая модель контактного теплообмена / Е. А. Ганин // Теплотехнические проблемы энергосберегающей технологии в текстильной и легкой промышленности : межвуз. сб. науч. тр. / Моск. текстил. ин-т им. А. Н. Косыгина; редкол.: А. С. Охотин (пред.) [и др.]. – М. : – 1989. – С. 6–23.

78. Попов, В. М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений / В. М. Попов. – М. : Энергия. – 1971. – 216 с.

79. Корнюхин, И. П. Тепломассообмен в теплотехнике текстильных производств: учеб. пособие для вузов / И. П. Корнюхин. – М. : Моск. гос. текст. ун-т им. А.Н. Косыгина, 2004. – 598 с.

80. Кукин, Г. Н. Текстильное материаловедение (текстильные полотна и изделия): учеб. для вузов / Г. Н. Кукин, А. Н. Соловьев, А. И. Кобляков. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Легпромбытиздат, 1992. – 272 с.

81. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – 472 с.

82. Результаты исследований и перспективы развития материалов для специальной защитной одежды пожарных / В. И. Логинов [и др.] // Пожарная безопасность. – 2012. – № 3. – С. 100–106.

83. Беляев, Н. М. Методы нестационарной теплопроводности / Н. М. Беляев, А. А. Рядно. – М. : Высшая школа, 1978. – 328 с.

84. Лыков, А. В. Тепломассообмен: справочник / А. В. Лыков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1978. – 480 с.

85. Берцун, В. Н. Элементы математической технологии / В. Н. Берцун. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 1984. – 98 с.

86. Норри, Д. Введение в метод конечных элементов / Д. Норри, Ж. Де Фриз. – М. : Мир, 1981. – 304 с.

87. Зино, И. Е. О точности одномерной аппроксимации для двойных стержней / И. Е. Зино, Ю. А. Соковишин // Инженерно-физический журнал. – 1976. – Т. 31, № 2. – С. 334–338.

88. Фатеева, Л. А. Коэффициент эффективности многослойных прямоугольных ребер / Л. А. Фатеева, Г. Е. Каневец // Инженерно-физический журнал. – 1977. – Т. 32, № 3. – С. 479–485.

89. Фэйджу, Л. Распространение тепла в композитных твердых телах с внутренним тепловыделением. Пер. с англ. / Л. Фэйджу, Х. Дэвис, Д. Рамкришна // Теплопередача. – 1979. – № 1. – С. 161–167.

90. Клименко, А. С. Аналитическое решение задачи теплопроводности в ограниченной многослойной области с локальным объемным источником в слое / А. С. Клименко, Н. А. Ситенок, Ю. Д. Коваль // Инженерно-физический журнал. – 1978. – Т. 35, № 2. – С. 352–356.

91. Новиков, В. С. Конечные интегральные преобразования для задач теплопереноса в нестационарных и неоднородных средах / В. С. Новиков // Инженерно-физический журнал. – 1981. Т. 41, № 1. – С. 149–157.

92. Новиков, В. С. Функции Грина некоторых задач переноса в нестационарных средах / В. С. Новиков // Инженерно-физический журнал. – 1982. Т. 42, № 6. – С. 1020–1023.

93. Голосов, А. С. Определение теплофизических характеристик двухслойных конструкций по данным измерений в нестационарных панелях / А. С. Голосов, В. И. Жук, Д. Н. Чубаров // Инженерно-физический журнал. – 1989. – Т. 56, № 2. – С. 291–298.

94. Гуревич, А. Г. Температурное поле трёхслойной плоской стенки при граничных условиях второго рода / А. Г. Гуревич, И. В. Балтер // Инженерно-физический журнал. – 1978. – Т. 34, № 5. – С. 932–933.

95. Черкасов, С. Г. Об одной сопряженной нестационарной задаче теплопроводности / С. Г. Черкасов // Инженерно-физический журнал. – 1984. – Т. 46, № 5. – С. 868–869.

96. О нестационарном режиме работы термобатареи / В. Л. Макаров [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 1985. – Т. 49, № 2. – С. 333–334.

97. Попов, В. М. К решению задачи по определению контактного термического сопротивления стягивания в условиях нестационарного теплообмена / В. М. Попов, В. И. Копанева // Инженерно-физический журнал. – 1990. – Т. 59, № 4. – С. 700.

98. Лакуста, К. В. Решение задач сопряжения многослойных сред преобразованием Лапласа / К. В. Лакуста, М. Л. Ленюк // Инженерно-физический журнал. – 1976. – Т. 31, № 4. – С. 742–743.

99. Канунников, О. В. Численное обращение преобразования Лапласа с помощью ряда Фурье при расчёте нестационарных температурных полей в слоистых конструкциях / О. В. Канунников, С. Л. Эсаулов // Инженерно-физический журнал. – 1991. – Т. 61, № 5. – С. 804–807.

100. Об одном приближенном методе решения задач нестационарной теплопроводности для многослойных систем / Ю. И. Дударев [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 1981. – Т. 40, № 5. – С. 926–927.

101. Вендик, С. В. К расчёту нестационарной теплопроводности в многослойных объектах при граничных условиях третьего рода / С. В. Вендик // Инженерно-физический журнал. – 1993. – Т. 65, № 2. – С. 249–251.

102. Адрианов, В. Н. Методика электро моделирования нестационарной теплопроводности в многослойных системах / В. Н. Адрианов // Промышленная теплотехника. – 1983. – № 4. – С. 8–14.

103. Хомченко, А. Н. К расчету температурных полей в сотовых структурах методом конечных элементов / А. Н. Хомченко // Инженерно-физический журнал. – 1987. – Т. 52, № 21. – С. 301–304.

104. Решетин, О. Л. Метод расчета температурного поля в многослойных средах / О. Л. Решетин // Инженерно-физический журнал. – 1982. – Т. 43, № 3. – С. 483–492.

105. Пристрем, А. М. Аналитический подход к расчёту распределения температуры в многослойных структурах при нагреве сканирующим лазерным излучением непрерывного действия / А. М. Пристрем, Н. И. Данилович, В. А. Лабунов // Инженерно-физический журнал. – 1987. – Т. 53, № 6. – С. 1000–1010.

106. Макогонов, В. А. О возможности приведения многослойных конструкций к однослойным при тепловых расчетах / В. А. Макогонов // Изв. вузов. Серия «Строительство и архитектура». – 1974. – № 4. – С. 137–140.

107. Шкурко, Б. Ф. К вопросу инженерного теплового расчета конструкций / Б. Ф. Шкурко, В. П. Нечаев // Изв. вузов. Серия «Строительство и архитектура». – 1985. – № 3. – С. 93–96.

108. Приведение многослойных ограждающих конструкций к однослойным при тепловых расчетах / Ю. С. Васильев [и др.] // Вестник Юж.-Ур. гос. ун-т.: Серия «Строительство и архитектура». – 2008. – Вып. 6, № 12 (112). – С. 49–57.

109. Нагорная, А. Н. Математическое моделирование и исследование нестационарного теплового режима зданий : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.18 / А. Н. Нагорная ; Юж.-Ур. гос. ун-т. – Челябинск, 2008. – 20 с.

110. Коздоба, Л. А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности / Л. А. Коздоба – М. : Наука, 1975. – 228 с.

111. Шляхов, С. М. Нелинейная задача теплопроводности для составной кольцевой пластинки со смешанными условиями на границе / С. М. Шляхов, А. В. Серебряков // Инженерно-физический журнал. – 1989. – Т. 56, № 5. – С. 855.

112. Цулая, Т. С. Численное решение нелинейных краевых задач тепло- и электропереноса в многослойных системах / Т. С. Цулая // Инженерно-физический журнал. – 1977. – Т. 32, № 3. – С. 544–545.

113. Кривошей, Ф. А. Тепловые режимы многослойных корпусов теплообменных аппаратов / Ф. А. Кривошей, С. В. Клецкий // Промышленная теплотехника. – 1980. – № 2. – С. 72–77.

114. Михайлов, В. В. Оптимизация многослойной изоляции / В. В. Михайлов // Инженерно-физический журнал. – 1980. – Т. 39, № 2. – С. 286–291.

115. Рудобашта, С. П. Зональный метод расчета непрерывно действующих массообменных аппаратов для систем с твердой фазой / С. П.

Рудобашта, А. Н. Плановский, Э. Н. Очнев // ТОХТ. – 1974. – Т. 8, № 1. – С. 22–29.

116. Федосов, С. В. Нестационарный тепло- и массоперенос в многослойных ограждающих конструкциях. // С. В. Федосов, А. М. Ибрагимов / Строительные материалы. – 2006. – №4. – С. 86–87.

117. Ибрагимов, А. М. Нестационарный тепло- и массоперенос в строительных материалах и конструкциях при несимметричных граничных условиях. Часть I // А. М. Ибрагимов / Строительные материалы. – 2006. – №7. – С. 72–73.

118. Ибрагимов, А. М. Нестационарный тепло- и массоперенос в строительных материалах и конструкциях при несимметричных граничных условиях. Часть II // А. М. Ибрагимов / Строительные материалы. – 2006. – №8. – С. 88–89.

119. Полежаев, Ю. В. Тепловая защита / Ю. В. Полежаев, Ф. Б. Юревич; под ред. А. В. Лыкова. – М. : Энергия, 1976. – 392 с.

120. Пехович, А. И. Расчёты теплового режима твёрдых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких. – Л. : Энергия, 1968. – 304 с.

121. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, А. А. Осипова, А. С. Сукомел. – Изд. 3-е перераб. и доп. – М. : Энергия, 1975. – 488 с.

122. Гухман, А. А. Введение в теорию подобия: учебное пособие для ВТУЗов / А. А. Гухман. – 2-е изд., доп. и перераб. – М. : Высшая школа, 1973. – 296 с.

123. Гусаров, А. М. Исследование распределения температуры в многослойном пакете материалов боевой одежды пожарных при тепловом воздействии / А. М. Гусаров, А. А. Кузнецов, Н. М. Дмитрикович, С. М. Данилова-Третьяк // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2014. – № 4. – С. 87–92.

124. Вержбицкий, В. М. Основы численных методов: учебник для вузов / В. М. Вержбицкий. – М. : Высшая школа, 2002. – 840 с.

125. Разработка методов и технологии получения огнестойких тканей с металлизированным покрытием: отчёт о НИР (промеж.) / Учр. «Научно-исследовательский центр Витебского областного управления МЧС Республики Беларусь»; рук. темы Стетюкевич Н.И. – Витебск, 2007. – 29 с. – № ГР 2006892.

126. ССБТ. Одежда пожарных специальная защитная от повышенных тепловых воздействий. Общие технические условия: СТБ 1972-2009.– Введ. 01.01.2010. – Минск: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2009. – 46 с.

127. Дмитрикович, Н. М. Количественная оценка защитных свойств материалов специальной защитной одежды / Н. М. Дмитрикович, А. М. Гусаров, А. А. Кузнецов // Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации : материалы международной научно-практической конференции, Гомель, 24–25 мая 2012 г. : в 2 ч. / ГУО "Гомельский ин-

женерный институт" МЧС Республики Беларусь. – Гомель, 2012. – Ч.1. – С. 160–161.

128. Гусаров, А. М. Оценка времени безопасной эксплуатации боевой одежды пожарных при различном уровне теплового воздействия / А. М. Гусаров, А. А. Кузнецов // Тезисы докладов 49 Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов / УО "ВГТУ". – Витебск, 2016. – С. 131–132.

129. Гусаров, А. М. Совершенствование системы оценки теплозащитных свойств пакетов огнетермостойких материалов / А. М. Гусаров, А. А. Кузнецов, Н. М. Дмитракович // Вестн. Витеб. гос. технол. ун-та. – 2011. – Вып. 21. – С. 46–52.

130. Русецкий, Ю. Г. Прогнозирование времени безопасной эксплуатации пакета огнетермостойких материалов / Ю. Г. Русецкий, Н. М. Дмитракович, А. М. Гусаров и др. // Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации : материалы международной научно-практической конференции, Гомель, 24–25 мая 2012 г. : в 2 ч. / ГУО "Гомельский инженерный институт" МЧС Республики Беларусь. – Гомель, 2012. – Ч. 1. – С. 225.

131. Гурова, Е. Ю. Влияние термического старения на механические свойства нитей на основе ароматических полимеров : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.19.01 / Е. Ю. Гурова ; С.-Петерб. гос. ун-т технологии и дизайна. – СПб., 1993. – 20 с.

132. Перепелкин, К. Е. Закономерности изменения свойств синтетических нитей при термическом старении / К. Е. Перепелкин, И. Ю. Моргоева, И. В. Андреева // Химические волокна. – 2001. – № 1. – С. 45–49.

133. Бызова, Е. В. Старение параарамидных нитей под влиянием эксплуатационных воздействий : автореф. дис. ... канд. наук : 05.19.01 / Е. В. Бызова ; С.-Петерб. гос. ун-т технологии и дизайна. – СПб., 2003. – 16 с.

134. Термическая деструкция ароматических термостойких нитей в среде воздуха и азота / К. Е. Перепелкин [и др.] // Химические волокна. – 2005. – № 3. – С. 36–38.

135. Гусаров, А. М. Влияние многоциловой тепловой нагрузки на прочностные характеристики материала верха боевой одежды пожарных / А. М. Гусаров, Н. М. Дмитракович, А. А. Кузнецов // Чрезвычайные ситуации: теория и практика : материалы международной научно-практической конференции курсантов, студентов, магистрантов, адъюнктов и аспирантов, Гомель, 28 апреля 2011 г. : в 2 ч. / УО "Гомельский инженерный институт" МЧС Республики Беларусь, Гомельский филиал Национальной академии наук Беларуси. – Гомель, 2011. – Ч. 1. – С. 57–60.

136. Гусаров, А. М. Использование метода динамического индентирования для комплексной оценки материала верха боевой одежды

пожарных при многоцикловом тепловом воздействии / А. М. Гусаров, А. А. Кузнецов, Н. М. Дмитракович // Чрезвычайные ситуации : предупреждение и ликвидация. – 2012. – № 2. – С. 140–147.

137. Богданофф, Дж. Вероятностные модели накопления повреждений / Дж. Богданофф, Ф.Козин ; Пер. с англ. – М. : Мир, 1989. – 344 с.

138. Кузнецов, А. А. Оценка и прогнозирование физико-механических свойств текстильных нитей / А. А. Кузнецов, В. И. Ольшанский. – Витебск : ВГТУ, 2004. – 226 с.

139. Кузнецов, А. А. Разработка экспресс-методов оценки и прогнозирования физико-механических свойств текстильных нитей : дис. ... д-ра техн. наук : 05.19.01 / А. А. Кузнецов. – М., 2007. – 364 л.

140. Иваненков, Д. А. Прогнозирование усталостных свойств текстильных нитей : дис. ... канд. техн. наук : 05.19.01 / Д. А. Иваненков. – Витебск, 2009. – 279 л.

141. Седякин, Н. М. Об одном физическом принципе теории надёжности // Н.М. Седякин / Известия АН СССР, Техническая кибернетика. – 1966. – № 3. – С. 80–87.

142. Смагин, В. А. Физико-вероятностные модели прогнозирования надёжности на основе форсирования испытаний / В. А Смагин // Надёжность и контроль качества. – 1998. – № 4. – С. 15–23.

143. Смагин, В. А. Теоретическое обобщение физического принципа надёжности профессора Н. М. Седякина испытаний / В. А Смагин // Надёжность. – 2005. – № 1. – С. 3–13.

144. Гусаров, А. М. Исследования устойчивости пакета материалов боевой одежды пожарного к многоцикловому тепловому воздействию / А. М. Гусаров, А. А. Кузнецов, Н. М. Дмитракович // Вестн. Витеб. гос. технол. ун-та. – 2012. – Вып. 22. – С. 39–47.

145. Гусаров, А. М. Прогнозирование температуры на внутренней поверхности пакета материалов боевой одежды пожарного при многоцикловом тепловом воздействии / А. М. Гусаров, А. А. Кузнецов, Н. М. Дмитракович // Чрезвычайные ситуации : предупреждение и ликвидация. – 2012. – № 2. – С. 140–147.

146. Гусаров, А. М. Исследование теплозащитных свойств одежды пожарных / А. М. Гусаров, А. А. Кузнецов // Межвузовская научно-техническая конференция аспирантов и студентов "Молодые ученые – развитию текстильной и легкой промышленности" (Поиск-2012) : сборник материалов, 23–25 апреля 2012 г. : в 2 ч. / ИГТА. – Иваново, 2012. – Ч. 2. – С. 94–96.

147. Гречишников, Е. А. Многоцикловая тепловая нагрузка и теплозащитные свойства пакета материалов боевой одежды пожарных / Е. А. Гречишников, Е. В. Мацкевич, А. М. Гусаров, А. А. Кузнецов // Чрезвычайные ситуации: теория, практика, инновации : материалы международной научно-практической конференции, Гомель, 24–25 мая

2012 г. : в 2 ч. / ГУО "Гомельский инженерный институт" МЧС Республики Беларусь. – Гомель, 2012. – Ч. 1. – С. 155–156.

148. Фойгт, И. Стабилизация синтетических полимеров против действия света и тепла: Пер. с нем. / И. Фойгт; под. ред. Б. М. Коварской. – Л.: Изд-во «Химия», 1972. – 544 с.

149. Кирюхин, С. М. Качество тканей / С. М. Кирюхин, Ю. В. Додонкин. – М.: Легпромбытиздат, 1986. – 160 с.

150. Соловьев, А. Н. Оценка и прогнозирование качества текстильных материалов / А. Н. Соловьев, С. М. Кирюхин. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 181 с.

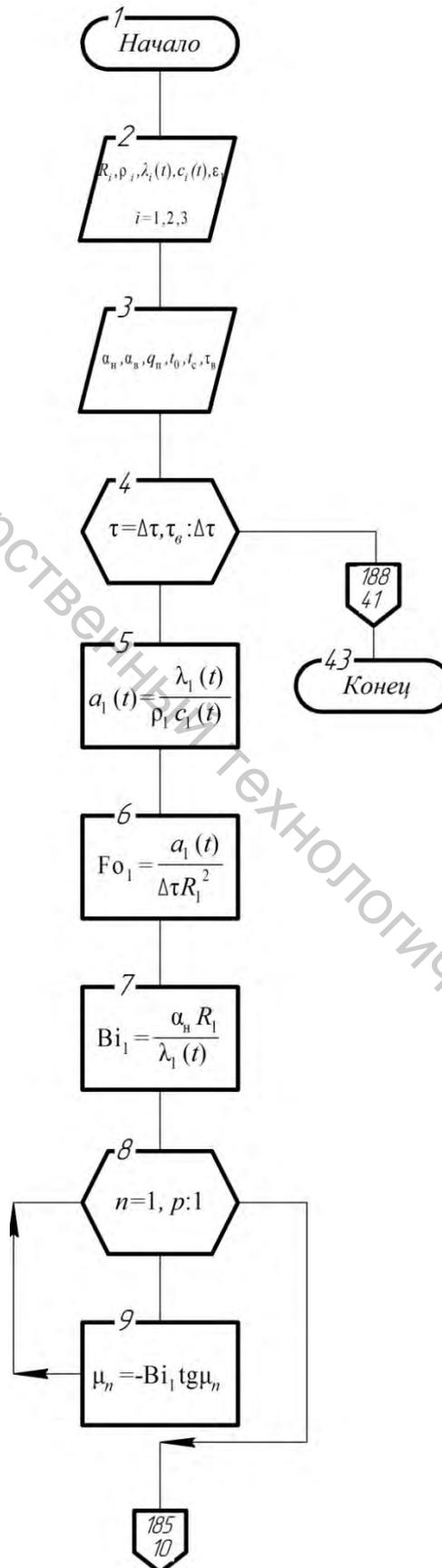
151. Архиреев, К. Э. Исследования по определению возможности увеличения срока службы боевой одежды пожарного / К. Э. Архиреев, И. Д. Игнатова, В. И. Логинов // Пожарная безопасность. – 2014. – № 4. – С. 61–65.

152. Гусаров, А. М. Влияние основных эксплуатационных факторов на теплозащитные свойства боевой одежды пожарных / А. М. Гусаров, А. А. Кузнецов // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 2015. – Т. 28, № 2. – С. 49–53.

153. Гусаров, А. М. Влияние многоцикловой тепловой нагрузки на время безопасной эксплуатации боевой одежды пожарных / А. М. Гусаров, А. А. Кузнецов // Международная научно-техническая конференция "Современные наукоемкие технологии и перспективные материалы текстильной и легкой промышленности" (Прогресс-2012) : сборник материалов, 30 мая – 1 июня 2012 г. : в 2 ч. / ФГБОУ ВПО "ИГТА". – Иваново, 2012. – Ч. 1. – С. 197–198.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

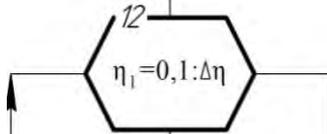
Блок-схема расчета температурных полей в трехслойном пакете материалов для боевой одежды пожарных



184
9

10
 $T_{1,R} = T_1(R_1, \tau - \Delta\tau)$

11
 $\theta_{1,0}(\eta_1)$
 $\theta_{1,R}$

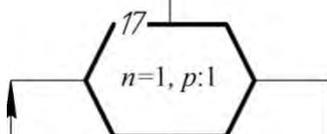


13
 $\theta_1(\eta_1, Fo_1)$
 $T_1(x_1, \tau)$

14
 $q_1 = -\lambda_1(t) \frac{dT_1(x_1, \tau)}{dx_1}$

15
 $a_2(t) = \frac{\lambda_2(t)}{\rho_2 c_2(t)}$

16
 $Fo_2 = \frac{a_2(t)}{\Delta\tau R_2^2}$



18
 $\mu_n = (2n-1) \frac{\pi}{2}$

186
19

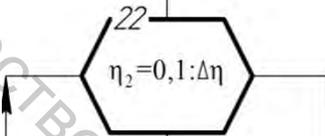
Витебский государственный технологический университет

185
18

19
 $T_{2,R} = T_2(R_2, \tau - \Delta\tau)$

20
 $\theta_{2,0}(\eta_2)$

21
 $Ki_2 = \frac{q_1 R_2}{\lambda_2(t) T_{2,R}}$



23
 $\theta_2(\eta_2, Fo_2)$
 $T_2(x_2, \tau)$

24
 $q_2 = -\lambda_2(t) \frac{dT_2(R_2, \tau)}{dx_2}$

25
 $a_3(t) = \frac{\lambda_3(t)}{\rho_3 c_3(t)}$

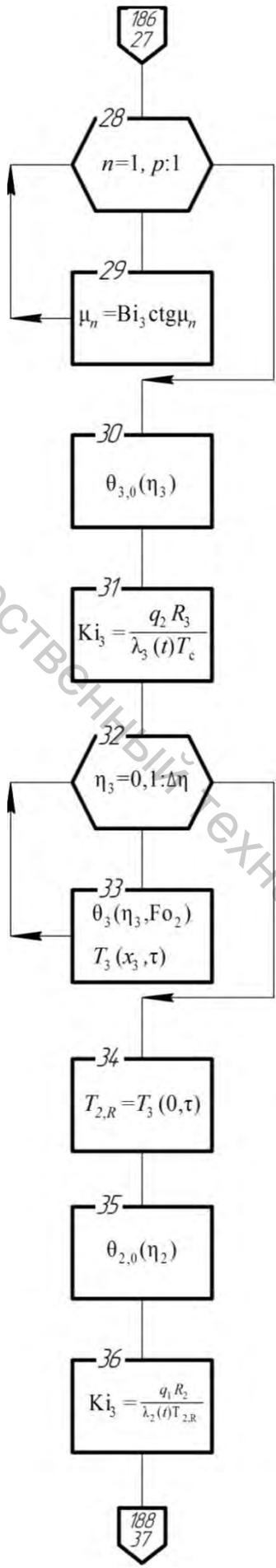
26
 $Fo_3 = \frac{a_3(t)}{\Delta\tau R_3^2}$

27
 $Bi_3 = \frac{\alpha_b R_3}{\lambda_3(t)}$

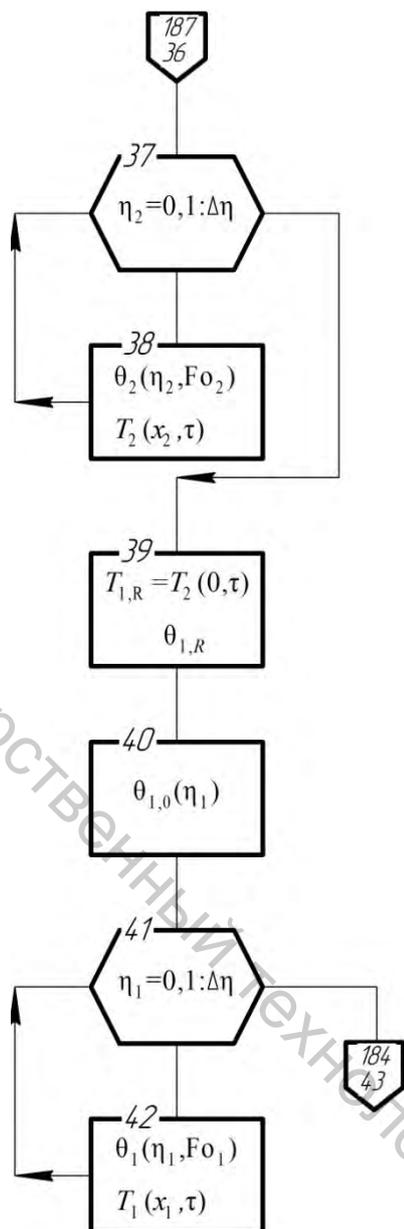
187
28

Витебский государственный технологический университет

Витебский государственный технологический университет



Витебский государственный технологический университет



Научное издание

Гусаров Алексей Михайлович
Кузнецов Андрей Александрович

**ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ
СВОЙСТВ ПАКЕТОВ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ
ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ**

Монография

Редактор *Н. В. Медведева*
Корректор *Н. В. Медведева*
Компьютерная верстка *А. М. Гусаров*

Подписано к печати 16.11.2017. Формат 60x90 1/16. Усл. печ. листов 10,9.
Уч.-изд. листов 12,2. Тираж 30 экз. Заказ № 372.

Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»
210035, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.