

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Политехнический институт  
Кафедра инженерной экологии и безопасности жизнедеятельности

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ Т.А.Кулагина  
подпись  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**  
по направлению подготовки 20.03.01. Техносферная безопасность  
«Усовершенствование элементов боевой одежды пожарных»  
тема

Руководитель	_____	к.т.н, доцент	Т.А. Енютина
	подпись, дата		
Выпускник	_____		Е.К. Батухтин
	подпись, дата		
Нормоконтролер	_____		Е.Н. Зайцева
	подпись, дата		

Красноярск 2019

## РЕФЕРАТ

ВКР по теме «Усовершенствование элементов боевой одежды пожарных» содержит 61 страницы текстового документа, 11 использованных источников, 5 листов графического материала.

БОЕВАЯ ОДЕЖДА ПОЖАНОГО, СРЕДСТВА ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ РУК, НИТИНОЛ, ЗАЩИТНЫЙ ВКЛАДЫШ, КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН, ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ.

Целью ВКР является разработка дополнительного защитного вкладыша от перегрева, с целью повышения термического сопротивления перчаток пожарного. Результатом является повышение уровня безопасности и увеличение времени работы сотрудников при ликвидации возгорания. Выполнены расчеты теплотехнических характеристик вкладыша. Конструкция вкладыша представлена в заявке на полезную модель.

Полезная модель планируется к применению в составе средств индивидуальной защиты и касается СИЗР, а именно перчаток. Защитный вкладыш содержит многослойный материал и выполнен в виде «гармошки», с возможностью образования воздушного пространства между слоями. Размеры вкладыша соизмеримы с ладонной частью перчатки пожарного. На одном из слоёв или на дополнительной подкладке закреплены прямоугольные пружины с возможностью свободного перемещения и образования пространства между слоями, причём пружины изготовлены из материала с памятью формы, в частности нитинола. В изотермических условиях пружины находятся в сжатом состоянии. При повышении температуры пружины автоматически разворачиваются и создают дополнительный воздушный слой. Вкладыш устанавливается между слоями, составляющими перчатку.

Защитный вкладыш от перегрева имеет простую конструкцию и может быть выполнен любой произвольной формы.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 Общие сведения о средствах индивидуальной защиты сотрудников противопожарных подразделений и материалах для их совершенствования ..	7
1.1 Виды боевой одежды пожарных .....	7
1.2 Средства защиты рук .....	16
1.3 Нитинол.....	20
2 Разработка конструкции вкладыша для средств индивидуальной защиты рук .....	25
2.1 Актуальность разработки защитного вкладыша .....	25
2.2 Патентный поиск.....	26
2.3 Конструкция защитного вкладыша от перегрева .....	33
3 Теплообмен в щелевых каналах .....	36
3.1 Постановка вопроса.....	36
3.2 Конвективный теплообмен в щелевых каналах.....	36
3.2.1 Общие сведения о конвективном теплообмене.....	36
3.2.2 Система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена ...	39
3.2.3 Анализ системы дифференциальных уравнений .....	43
3.2.4 Расчет теплообмена при малых значениях $\delta$ .....	51
3.2.6 Расчет теплового потока по формулам теплопроводности .....	55
3.2.7 Выводы к «Расчёту тепловых потоков по формулам теплопроводности» .....	58
3.2.8 Оценка влияния пружин на теплообмен в щелевом пространстве.....	58

3.2.9 Расчёт максимального давления, которое выдерживают пружины	59
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	60
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	61

## ВВЕДЕНИЕ

Выпускная квалификационная работа (ВКР) посвящена варианту модернизации средства индивидуальной защиты рук (СИЗР) сотрудников федеральной противопожарной службы (ФПС) и аварийно-спасательных подразделений связанных с выполнением работ в местах с источниками повышенных и опасных температур.

Целью выпускной квалификационной работы «Усовершенствование элементов боевой одежды пожарных (БОП)» является разработка дополнительного защитного вкладыша с целью повышения термического сопротивления перчаток пожарного, благодаря чему возможно повысить уровень безопасности сотрудников, а также увеличить безопасное время работы при ликвидации возгорания за счет снижения тепловой нагрузки.

В работе решаются следующие задачи:

- ознакомление с современным состоянием СИЗ в виде БОП и СИЗР;
- разработка конструкции защитного вкладыша;
- проведение теплотехнических расчетов вкладыша;
- оформление заявки на полезную модель.

В процессе работы проведен патентный поиск, позволивший выявить аналогичные изделия и подобрать прототип для разработки модели защитного вкладыша.

При выполнении ВКР были учтены требования по оформлению [1].

В качестве прототипа для монтажа защитного вкладыша был принят вариант перчатки пожарного (полезная модель № 168072 от 19.04.2016 заявка № 201611529, опубликовано 17.01.2017. бюл. № 2, Митга. В. П.) [2], конструкция которой может быть улучшена с помощью предложенного защитного вкладыша за счет минимальных изменений.

В соответствии с требованиями к боевой одежде пожарных плотность теплового потока не должна превышать  $q = 5 \text{ кВт/м}^2$ , а коэффициент теплопроводности слоя должен быть  $X > 0.06 \text{ Вт/(м*К)}$ .

Для проверки соответствия теплотехнических характеристик предлагаемого изделия проведён расчет тепловых потоков и коэффициентов теплопроводности.

На основании проведенных исследований составлена заявка на полезную модель «Защитный вкладыш от перегрева» представленный в Федеральный институт патентной собственности.

# **1 Общие сведения о средствах индивидуальной защиты сотрудников противопожарных подразделений и материалах для их совершенствования**

## **1.1 Виды боевой одежды пожарных**

Боевая одежда пожарного (БОП) является основным средством индивидуальной защиты для сотрудников противопожарных и аварийно-спасательных подразделений. БОП должен обеспечивать безопасность человека от воздействия вредных и опасных факторов возникающих при проведениях работ, связанных с ликвидацией пожара и проведении первичных аварийно-спасательных работ. К основным факторам можно отнести следующие воздействия: тепловое, механическое, вредные вещества выделяющиеся в процессе горения, вода, неблагоприятные климатические условия и пр. Боевая одежда пожарного подразделяется на два варианта исполнения. Первый вариант исполнения используется сотрудниками, осуществляющими управление пожарным подразделением, различия заключаются в удлиненной куртке и дополнительным выделением с помощью расположенных в два ряда светоотражательных полос. Вариант 2 предназначен для сотрудников непосредственно задействованных в процессе тушения пожара. БОП обязателен в использовании всеми сотрудниками при ликвидации возгораний любого типа всеми категориями работников.

При производстве боевой одежды пожарного используются большой ассортимент разновидностей тканей, но в основном распространение получили брезентовая ткани с дополнительной огнезащитной пропиткой, водостойкая ви-нилискожа, и другие синтетические материалы устойчивые к воздействию вредных и опасных факторов.

В соответствии с ГОСТ Р 53264-2009 «Техника пожарная. Специальная защитная одежда пожарного. Общие технические требования. Методы испытания» [3], специальная одежда пожарного (СЗО) подразделяется на следующие виды:

1. Боевая одежда пожарного - специальная одежда общего назначения БОП, имеет различные варианты исполнения в зависимости от климатической зоны использования.

2. Специальная одежда пожарного с защитой от повышенного теплового воздействия, по степени защиты подразделяется на легкий, полутяжелый и тяжелый типы СОЗ.

3. Специальная защитная одежда изолирующего типа. К данному типу относятся термоагрессивостойкий и радиационно-защитный костюмы.

Для комплектации различных типов СЗО используются:

1. Средства защиты головы (каска, шлемы, подшлемники).
2. Средства защиты рук (краги, перчатки пятипалые или трехпалые, рукавицы).
3. Средства защиты ног (сапоги резиновые или кожаные).
4. Термостойкое белье.

Тактические характеристики БОП зависят от ситуаций, в которых она используется. В настоящее время применяется следующая классификация боевого обмундирования пожарных:

1. БОП первого уровня показан на рисунке 1.



Рисунок 1 - БОП 1

Предназначается для работы в среде, где существует риск большой интенсивности распространения пламени, включая возможность контакта с прямым источником огня. Она изготавливается из термостойких материалов и используется по большей части в работе газодымозащитников. Она позволяет работать в



среде с температурой до +300 °С не менее 15 секунд. Кроме того, антигорючая пропитка допускает контакт человека с прямым пламенем на период, не превышающий 15 секунд и максимальной температурой горения до +400 °С. Контакт с твердыми горящими поверхностями может осуществляться до 7 секунд. Вес комплекта - до 5 кг. Для изготовления используются такие материалы, как сило-текс или пировитекс.

2. БОП второго уровня изображен на рисунке 2.



Рисунок 2 - БОП-2

Данный комплект чаще всего изготавливается из материалов, схожих по своим характеристикам с брезентом. В некоторых случаях для производства БОП второго уровня используется льняная парусина мокрого прядения. Несмотря на то, что боевая одежда используется для тушения огня, не рекомендуется её использовать в случаях, когда есть риск прямого контакта с огнем. БОП второго уровня применяется для работы в диапазоне температур от -40 до +200 °С. Полная защита кожных покровов человека обеспечивается при воздействии теплового потока мощностью до 5 кВт/м<sup>2</sup> и температуре окружающей среды до + 200 °С. Время работы в таких условиях не должно превышать 240 сек. Костюм выдерживает воздействие прямого пламени до 5 сек. Вес комплекта - до 6.5 кг.

3. БОП третьего уровня изображен на рисунке 3.



Рисунок 3 - БОП-3

Изготавливается из невоспламеняющихся материалов, например, винилискожи, полимерных пленочных составов. БОП третьего уровня позволяет защитить органы человека от высоких температур с небольшой интенсивностью распространения огня. Она рекомендована для ношения водителями пожарного автотранспорта, а также сотрудниками ИПЛ. Данный боевой комплект применяется при температурах от  $-45$  до  $+200$  °С. Максимальный уровень защиты достигается при температуре до  $+180$  °С на протяжении 240 секунд. Обеспечивает защиту от прямого действия пламени до 5 с. Вес комплекта - не менее 6.5 кг. Технические характеристики БОП в зависимости от класса защиты представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Характеристики БОП

Основные характеристики	Класс защиты БОП		
	БОП-1	БОП-2	БОП-3
Устойчивость к воздействию сильного теплового излучения 5,0 кВт/м <sup>2</sup> , не менее, сек	240	240	240
Устойчивость к открытому пламени, сек	15	5	5
Теплопроводность в диапазоне от +50 до +150 °С	0,06	0,06	-0,06
Температурный диапазон, °С	-50/+300	-50/+200	-40/+200
Устойчивость к газовой среде при температуре не более 300 °С, сек	300	240	180
Устойчивость к контакту с поверхностями нагрева до 400 °С, сек	7	3	1
Кислородный индекс, процент	28	26	26
Вес БОП, кг	5	6,5	-
Группа предназначения	Газодымо защитники	Командный и рядовой состав	Командный состав, водители.

Защитная одежда пожарного от повышенных тепловых воздействий полутяжелого типа. Относится к полутяжелому типу специальной защитной одежды пожарных от повышенных тепловых воздействий (СЗО ПТВ) по НПБ 161-97 [4]. Комплект теплоотражательный ТОК-200 предназначен для защиты от повышенных температур, теплового излучения и других опасных и вредных факторов окружающей среды, возникающих при тушении пожаров и проведении первоочередных аварийно-спасательных работ. Обеспечивает защиту от растворов поверхностно-активных

веществ, пониженных температур, повышенных температур, воды и водных растворов, неблагоприятных климатических воздействий, ветра, осадков. Комплект теплоотражательный ТОК-200 состоит из куртки, брюк, капюшона со смотровым иллюминатором, трехпалых перчаток и бахил. Куртка с центральной бортовой застежкой на пуговицах. Вид ТОК-200 представлен на рисунке 4.



Рисунок 4 - ТОК-200

На спинке объемный отсек для размещения дыхательного аппарата. Брюки с расширенным цельнокроеным поясом, усилительными накладками в области колен. Капюшон закрывающий верхнюю часть туловища. Верхняя часть капюшона на подкладке, со смотровым отверстием-иллюминатором. Трехпалые перчатки с напалками для большого и указательного пальцев, усилительной накладкой из спилка на ладонной части, на подкладке с теплоизолирующим слоем. Бахилы с пухтой, с надстрочным двухслойным голенищем, усиленной подошвой из спилка, усилительной накладкой из спилка на пяточной части. Комплект теплоотражательный ТОК-200 изготавливается из ткани теплоотражательный «Термит», бязи с пропиткой ОП, спилка. Стачные швы верха куртки, брюк, перчаток, бахил выполняются двумя строчками. Настрачивание голенищ бахил, накладок кармана, усилительных накладок

рамки смотрового отверстия-иллюминатора также выполняется двумя строчками.

Характеристики теплоотражательного комплекта ТОК-200 приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Теплофизические и физико-механические показатели ТОК-200

Наименование показателя	Значение показателя
Устойчивость к воздействию температуры окружающей среды, с, не менее:	
200 °С	600
Устойчивость к воздействию теплового потока, с, не менее:	
18 кВт/м <sup>2</sup> ;	600
10 кВт/м <sup>2</sup> ;	900
Устойчивость к воздействию открытого пламени, с, не менее	20
Устойчивость к контакту с нагретыми до 400 °С твердыми поверхностями, с, не менее	5
Коэффициент ослабления инфракрасного излучения, %, не менее	75

Комплект теплозащитный для пожарных (ТК-800) предназначен для использования при проведении работ по тушению крупных и сложных пожаров, в основном на предприятиях нефтегазодобывающей и нефтегазоперерабатывающей промышленности на открытых площадках показан на рисунке 5.



Рисунок 5 - Ток-800

Исходя из массы ТК-800, его значительных габаритов, а также ограниченности движений и обзора, в нем можно проводить следующие виды работ: разведку, работу с ручными пожарными стволами, пеногенераторами и с шанцевым инструментом, вскрытие и разборку строительных конструкций, открывание-закрывание задвижек.

Работы в данном комплекте должны выполняться только со средствами защиты органов дыхания (дыхательным аппаратом со сжатым воздухом).

Комплект ТК-800 состоит из: наружной оболочки (комбинезона) с аварийным клапаном выхода; капюшона с удлиненной пелериной; обуви; каски типа "Труд"; рукавиц. Комбинезон, капюшон и рукавицы имеют съемные теплоизолирующие подстежки. Комплект обуви в сборе включает в себя: бахилы со вставленными в них стельками из кремнеземной ткани с металлизированным покрытием и резиновыми союзками (типа НОЛ-1ФЭТ), а также валяные сапоги со стельками из теплоизолирующего материала.

Комплект ТК-800 обеспечивает защиту пожарного от повышенных тепловых воздействий: температуры до 800 °С; тепловых потоков с интенсивностью до 40 кВт/м<sup>2</sup>; кратковременных воздействий открытого пламени.

Специальная защитная одежда пожарного от повышенных тепловых воз-

действий изготавливается с использованием материалов с металлизированными покрытиями, предназначенная для защиты пожарного от повышенных тепловых воздействий (интенсивного теплового излучения, окружающей среды с высокой температурой, кратковременного контакта с открытым пламенем), механических воздействий и других вредных факторов, возникающих при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ в непосредственной близости к открытому пламени, а также от неблагоприятных климатических воздействий. Характеристики комплекта ТОК-800 приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Теплофизические и физико-механические показатели ТОК-800

Наименование показателя	Значение показателя
Устойчивость к воздействию температуры окружающей среды, с, не менее:	
800 °С	20
300 °С	960
Устойчивость к воздействию теплового потока, с, не менее:	
18 кВт/м <sup>2</sup> ;	960
25 кВт/м <sup>2</sup> ;	240
40 кВт/м <sup>2</sup> .	120
Устойчивость к воздействию открытого пламени, с, не менее	30
Устойчивость к контакту с нагретыми до 400 °С твердыми поверхностями, с, не менее	15
Коэффициент ослабления инфракрасного излучения, %, не менее	80

## 1.2 Средства защиты рук

Составным компонентом БОП любого класса являются средства индивидуальной защиты рук. Нормы пожарной безопасности (НПБ) 182-99 [5] определяют общие технические требования, методы испытаний и порядок оценки качества средств индивидуальной защиты рук пожарных (СИЗР), а также материалов, применяемых для их изготовления. Под СИЗР понимаются изделия, предназначенные для защиты кистей рук пожарных от вредных факторов окружающей среды, возникающих при тушении пожаров и проведении связанных с ними первоочередных аварийно-спасательных работ (повышенных температур, теплового излучения, контакта с нагретыми поверхностями, механических воздействий: прокола, пореза и т. п., воздействия воды и растворов поверхностно-активных веществ), а также от неблагоприятных климатических воздействий (отрицательных температур, осадков, ветра). СИЗР используются в комплекте с боевой одеждой пожарных.

Пакет материалов и тканей, используемых для изготовления СИЗР, должен состоять из материала верха, водонепроницаемого слоя, теплоизоляционной подкладки и внутреннего слоя. Допускается совмещение материала верха и водонепроницаемого слоя (материал с полимерным покрытием); водонепроницаемого слоя, теплоизоляционной подкладки и внутреннего слоя; в ладонной части СИЗР допускается использовать в качестве накладки дополнительный слой материала.

Конструкция СИЗР и используемые материалы должны защищать от проникновения на внутреннюю поверхность изделия поверхностно-активных веществ и агрессивных сред. Конструкция верхней части СИЗР (краг) должна быть совместима с конструкцией нижней части рукавов (напульсников) БОП.

Конструкция СИЗР должна позволять пожарному выполнять необходимые виды работ при тушении пожаров.

СИЗР выполняются в виде перчаток или двупалых рукавиц. Масса одной пары изделия должна составлять не более 0,6 кг.



В настоящее время выпускается и используется большое количество разновидностей исполнения перчаток.

Традиционным средством для защиты рук пожарного остаются брезентовые краги, пример изготовления показан на рисунке 6.



Рисунок 6 - Брезентовые краги

Огнестойкие пропитки, проникающие в структуру материала ориентированы на температурный диапазон 40°C-200°C и способны сопротивляться тепловому потоку до 5 кВт/м<sup>2</sup>. Иногда с брезентом используется винилискожа.

На рисунке 7 представлен вариант перчаток пожарного производства ССМ.



Рисунок 7 - Перчатки пожарного производство ССМ

Пятипалые перчатки с крагами — это четырехслойные защитные перчатки пожарных с мембраной.

Первый слой - изготавливается из подготовленной, устойчивой к воздействию воды и высоких температур натуральной кожи. При изготовлении краги используется спилка. С тыльной стороны, для обеспечения заметности нашивается устойчивая к огню светоотражающая лента. Для повышения прочности изделия при изготовлении применяется кевларовая нить.

Второй слой - выполняет функцию защиты от жидкостей. Для изготовления используются специальные материалы, не пропускающие жидкость.

Третий слой - выполняет дополнительную защитную функцию. При изготовлении применяют Кевлар и Номекс, которые способны обеспечить устойчивость к воздействию высоких температур, истиранию и механическим повреждениям.

Четвертый слой - изготавливается из кевлара, специально подготовленного для придания ему мягкости и эластичности. В связи с тем, что при изготовлении трикотажного полотна используется объемное плетение оно способствует термоизоляции.

Данные перчатки имеют большой запас прочности и устойчивы к истиранию. Все слои соединяются с помощью специальной технологии, которая исключает смещение и выворачивание слоев (например, при снятии или надевании перчатки на мокрую руку или в спешке).

Основные параметры материалов, применяемых для изготовления СИЗР соответствующих нормам, приведены в таблицах 4, 5, 6.

Таблица 4 - Теплофизические показатели материалов и тканей

Наименование показателя	Значение показателя
Устойчивость к воздействию температуры 300 °С, с, не менее	300
Устойчивость к воздействию теплового потока плотностью:	

## Окончание таблицы 4

Наименование показателя	Значение показателя
5 кВт/м <sup>2</sup> , с, не менее	240
40 кВт/м <sup>2</sup> , с, не менее	5
Устойчивость к воздействию открытого пламени, с, не менее	15
Устойчивость к контакту с нагретыми до 400 °С твердыми поверхностями, с, не менее	10

Таблица 5 - Физико-механические показатели материалов и тканей

Наименование показателя	Значение показателя
Поверхностная плотность, г/ м <sup>2</sup> , не более	600
Разрывная нагрузка:	
по основе, Н, не менее	700
по утку, Н, не менее	600
Сопротивление раздиранию:	
по основе, Н, не менее	60
по утку; Н, не менее	60
Усадка после намочания и высушивания, %, не более	5
Усадка после нагревания, %, не более	5
Морозостойкость, С, не выше	-50
Водонепроницаемость, мм вод.ст., не менее	800
Устойчивость к воздействию слабых (до 20 %) кислот и щелочей (H <sub>2</sub> BO <sub>4</sub> , HO, NaOH), объем стока при пулевом проникновении, %, не менее	80

Таблица 6 - Основные показатели материалов ладонной части и накладок

Наименование показателя	Значение показателя
Устойчивость к истиранию, циклов не менее	10000
Устойчивость к многократному изгибу, циклов не менее	10000
Жесткость при изгибе, Н, не более	0,4
Устойчивость к проколу, Н, не менее	80,0
Сопротивление порезу	20,0

### 1.3 Нитинол

Нитинол (никелид титана) - сплав титана и никеля (55 % никеля и 45% титана в составе). Данный сплав уникален тем, что обладает памятью первоначальной формы и сверхупругостью. Эффект памяти выражается тем что изделие из данного сплава при повышении температуры окружающей среды до порога фазового превращения восстанавливает форму, ранее приданную изделию при определенной температуре. Сверхупругость проявляется при нагревании во время перехода из одного структурного внутреннего состояния в другое. При температуре фазового превращения сплав как пружина принимает первоначальный вид. Механизм действия работы сплава изображен на рисунке 8.

Нитинол обладает высокими коррозионными свойствами, обладает высокой прочностью, высокой пластичностью в связи с тем способен восстанавливать исходную форму до 1000000 раз.

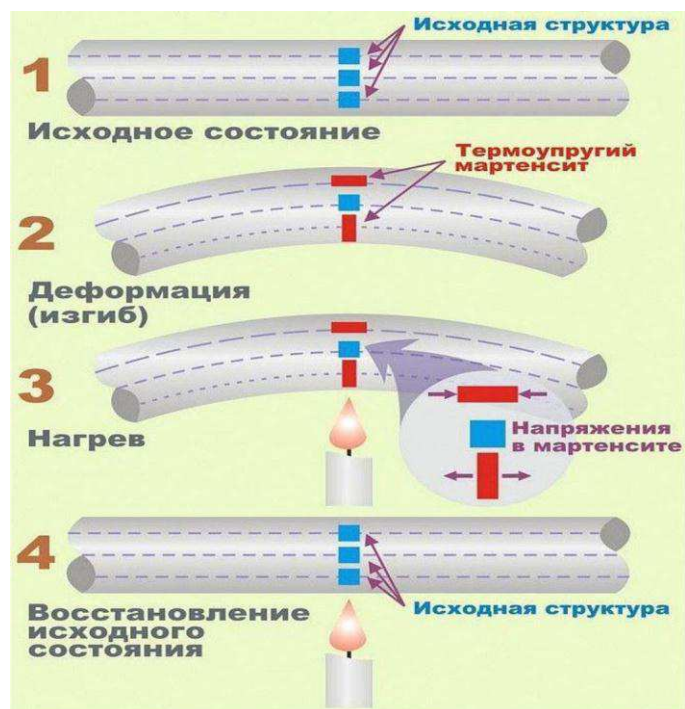


Рисунок 8 - Механизм действия сплава

Нитинол был разработан и испытан в США 1960 г. По замыслу разработчиков сплав создавался для использования в областях техники где было необходимо обеспечить высокую прочность материала с небольшим удельным весом, с возможностью работы в области высоких температур. При дальнейших исследованиях было обнаружено что легко деформирующиеся в охлажденном состоянии образцы из нитинола, при нагреве до определенных температур проявляли эффект памяти формы, при этом производя полезную работу. В настоящее время изделия из данного сплава нашли применение в медицине, робототехнике при создании тепломеханических устройств и других отраслях где имеется необходимость в применении эффекта памяти формы.

Эффект памяти формы в сплавах на основе Ni-Ti выражен очень ярко, причем возможна регулировка температур с помощью ввода дополнительных компонентов в сплав. Нитинол легко поддается обработке, устойчив к коррозии обладает хорошими физико-механическими свойствами.

Основная трудность в получении сплавов нитинол, что и обуславливает его стоимость, заключается в необходимости обеспечения их точного химического

состава. Это обусловлено очень большим влиянием последнего на температуру мартенситного превращения. Так, отклонение в содержании никеля на 0,5% может изменить температуру превращений на 50—60° С. Известные трудности в выплавке сплавов Нитинол создают также большая разница в плотностях никеля и титана и высокая активность титана в расплавленном состоянии, однако активность резко снижается при образовании однородного жидкого раствора.

Агрегаты для выплавки сплавов нитинол должны обеспечивать быстрый нагрев и хорошую защиту от окисления. Этим условиям удовлетворяют индукционные печи, а также дуговые печи с плавящимся электродом; более производительными и технологичными являются индукционные печи. Тигель для ведения плавки может быть или графитовым, или, что лучше, керамическим из окиси циркония (ZrCb). Вследствие большой активности расплавленного титана и значительной растворимости углерода в титане при ведении плавки в графитовом тигле в него вначале загружается уже ранее выплавленный сплав Нитинол в количестве около 10% от массы шихты; при ведении плавки в керамическом тигле вначале загружают никель. После расплавления нитинола или никеля небольшими порциями вводят остальную шихту. Плавку рекомендуется вести в защитной атмосфере или в вакууме. Разливку сплавов нитинол проводят при температуре 1400—1470° С [6].

Основные физико-механические свойства сплавов Ni-Ti приведены в таблицах 7, 8.

Таблица 7 - Физико-механические свойства сплавов с памятью форм [6]

Наименование свойства, единица измерения	Величина
Плотность, г/см <sup>3</sup>	6,45-6,55
Температура плавления, °С	1240-1310

окончание таблицы 7

именование свойства, единица измерения	Величина
Удельная теплоемкость $C_p$ , кал/моль °С	6-15
Интервал температур превращений, °С	-60 .....+160
Частично восстанавливая деформация	8-15%
Теплопроводность, Вт/см град	0,01
Модуль нормальной упругости, Мпа (при 100 °С)	50000-74000
Модуль сдвига G, Мпа (при 100 °С)	22000-25000
Коэффициент Пуассона, ^	0,33-0,48
Предел прочности, МПа	500-1500
Предел текучести, МПа	250-1100
Относительное удлинение, %	10-55
Величина деформации, обратимой при нагреве, %	8-10
Степень восстановления формы, %	92-100
Усилия, развиваемые при восстановлении формы, Н/мм <sup>2</sup>	400-950
Величина температурного восстановления формы, °С	30-15
Максимальная возвратимая деформация 8-10%	1 срабатывание
Максимальная возвратимая деформация 5-6%	100 срабатываний
Максимальная возвратимая деформация 3-4%	100000 срабатываний

Таблица 8 - Физические свойства стандартного нитинола по сравнению с нержавеющей сталью [6]

Свойства	Nitinol (Мартенсит(М) /Аустенит(А))	Нержавеющая сталь
Точка плавления (°С)	1310	1450
Плотность (г /см <sup>3</sup> )	6,5	8
Электрическое сопротивление (Ом см)	76 (М) / 82 (А)	72
Тепловое расширение (10 <sup>-6</sup> / К)	6,6 (М) / 11 (А)	17,3
Теплопроводность (Вт/(м К))	18	16,3
Модуль упругости (ГПа)	40 (М) / 75 (А)	193

Исходя из уникальных свойств сплава возможно разработать вариант дополнительного вкладыша, причём многократного, обратимого действия, для защиты рук пожарного.



## **2 Разработка конструкции вкладыша для средств индивидуальной защиты рук**

### **2.1 Актуальность разработки защитного вкладыша**

В процессе работы сотрудники пожарной и аварийно - спасательной службы постоянно сталкиваются со множеством вредных и опасных факторов, что в отдельных случаях приводит к травмам и гибели человека. В данной работе будет затронут только один из множества факторов, оказывающих воздействие на организм человека, а именно тепловое воздействие на кисти рук (воздействие на данную часть тела наиболее вероятно так - как основные операции человеком выполняются именно руками).

С данным фактором человек сталкивается в процессе непосредственного контакта с огнем, материалами, подвергшимися воздействию высоких температур. Контакт может возникнуть как осознано для выполнения определенной задачи (расчистка пути), так и на уровне рефлекторного действия (попытка сохранить вертикальное положение в процессе потери опоры) что наиболее опасно, так как невозможно своевременно оценить возможность полученного воздействия.

При ликвидации очага возгорания первоочередная задача сотрудника федеральной противопожарной службы (ФПС) является спасение людей, по каким-либо причинам оказавшихся в зоне действия пожара. В решении данной задачи принимается возможность травмирования сотрудника. В данной работе предложен вариант модернизации СИЗР который позволит снизить тепловое воздействие на руки человека, за счет чего теоретически снижается вероятность получения сотрудником термических ожогов, увеличивается время, которое пожарный может использовать для проведения работ в зоне опасных температур.

В настоящее время существует большое разнообразие вариантов исполнения защитных перчаток, но несмотря на это травмы, полученные при проведении

работ, присутствуют. Из этого можно сделать вывод о необходимости дальнейшего поиска путей повышения безопасности сотрудников ФПС.

С целью снижения риска получения термических ожогов нами предложен вариант с применением дополнительного защитного вкладыша.

Для выявления аналогичных моделей и ознакомления с вариантами существующих предложений произведен патентный поиск.

## 2.2 Патентный поиск

При разработке полезной модели был произведен патентный поиск для выявления аналогичных разработанных ранее изделий. Патентный поиск производился по конструкции перчаток специального назначения. В результате проведенной работы были обнаружены следующие варианты:

Известна полезная модель (патент на полезную модель № А41D 19/05 (2006.01) RU 172694 U1 заявка 2016144545 от 14.11.2016, бюл. 20 от 19.07.2017. Смирнова Е. Л., Лукашевский А. В., Шемаков А. В.) [7] в которой предложен вариант перчатки для защиты кистей рук от опасных и вредных факторов окружающей среды, возникающих при тушении пожаров и проведении первоочередных аварийно-спасательных работ. Вариант изготовления перчатки представлен на рисунке 9.

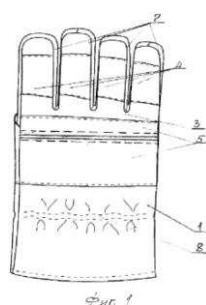


Рисунок 9 - Вариант изготовления перчатки

В предложенном варианте исполнения перчатки пожарного результат достигается за счет разделения перчатки на наружную (1) и внутреннюю (2), при этом тыльную сторону (3) наружной перчатки изготавливают с применением вставок (4), защищающими межфаланговые суставы пальцев и дополнительной накладкой (5) предназначенной для защиты пясти и пястно - фаланговых суставов пальцев. Накладку (5) изготавливают из двух частей, разделенных в области пястно - фаланговых суставов пальцев.

В предложенной перчатке отдается предпочтение при изготовлении:

- ладонная часть (6) и ластовицы (7) наружной перчатки изготавливаются с применением материалов на основе параарамидных волокон с наружным полимерным покрытием, тыльная часть (3) изготавливается со внутренним слоем аналогичного материала;

- с внутренней стороны для дополнительной фиксации перчатки предусмотрена закрепленная стягивающая эластичная лента (8);

- части накладки (5) для дополнительной свободы движения изготавливаются различного размера, верхняя узкая, нижняя широкая;

- накладка (5) и каждая вставка (4) состоят из нескольких слоев. Первый слой дополнительно покрывается наружным полимерным покрытием, второй слой состоит из иглопробивного теплоизоляционного материала, также предусмотрен слой ватина иглопрошивного;

- внутреннюю перчатку (2) изготавливают из материалов, обладающих водонепроницаемостью и дополнительно оснащают манжетой, выполненной из трикотажного полотна (9).

В данной полезной модели предлагается улучшение изделия за счет повышения подвижности пальцев, и не рассматривается дополнительная защита от теплового воздействия на кисти рук при проведении работ.

Известна полезная модель (Полезная модель № 116050 от 21.02.2012 заявка № 2012106154, опубликовано 20.05.2012. бюл. №14, Мефокова О. А, Фадеев О. А.) [8], относящаяся к средствам индивидуальной защиты человека, точнее, для защиты рук пожарных и спасателей в чрезвычайных ситуациях.



Предложены несколько вариантов исполнения перчаток, один из них представлен на рисунке 10.



Рисунок 10 - предложенный варианты изготовления перчатки

1. Перчатка, предназначенная для пожарных, состоит конструктивно из двух перчаток: наружной и внутренней. Перчатка оснащена вставками для дополнительной защиты пясти и пястно - фаланговых суставов и дополнительными гофрированными вставками, защищающими суставы находящимися между проксимальной и промежуточной фалангами пальцев. Все вставки имеют наружный слой, изготовленный с применением термостойкого материала, с дополнительно расположенным под ним слоем материала способного демпфировать удар.

2. перчатка от варианта 1, отличающаяся наличием дополнительного матерчатого материала, необходимого для создания прижимной силы демпфирующему материалу в области суставов пальцев, к термостойкому наружному материалу. В данном случае в качестве демпфирующего материала, автором предложен вспененный каучук с закрытой пористой структурой. Наружный слой предлагается изготавливать из материала с полимерным покрытием.

3. перчатка от варианта 1, отличающаяся наличием дополнительного матерчатого материала, необходимого для создания прижимной силы демпфирующему материалу в области суставов пальцев, к термостойкому наружному материалу. В данном случае в качестве демпфирующего материала, автором предложен поролон. Наружный слой предлагается изготавливать из материала с полимерным покрытием.

4. Данный предложенный вариант отличается от приведенных выше другим вариантом изготовления краги. Крага ладонной части предлагается изготавливаться из материалов с основой из параарамидных волокон и обращенным наружу полимерным покрытием, изготовленным на основе термостойких каучуков. Остальная часть ладони наружной перчатки изготавливается из двухлицевого трикотажа, с дополнительным покрытием наружной части силиконом

5. Перчатка отличается от выше описанных тем, что крагу с тыльной стороны наружной перчатки изготавливают с применением материалов в основе которых находятся арамидные волокна. С внутренней стороны автором предлагается применять полимерное покрытие.

6. Предложенный вариант отличается применение на напалках дополнительных вставок, расположенных ниже и выше гофрированных вставок. Для изготовления предлагается материалы с основой из параарамидных волокон, с дополнительным полимерным слоем с наружной стороны перчатки.

7. Вариант отличается от остальных тем что тыльную часть наружной перчатки предлагается выполнить с дополнительной накладкой из демпфирующего материала, для защиты суставов пальцев. Перчатка состоит из внутренней и наружной частей.

8. Перчатка схожая с вариантом 7, но дополнительно предлагается оснащаться демпфирующим материалом на основе вспененного каучука для защиты суставов пальцев.

Недостатками данной конструкции являются достаточная техническая сложность изготовления перчатки, использования в качестве одного из материалов

поролону, так как в случае механического повреждения перчатки при доступе огня к поролону, происходит разрушение конструкции.

Известна полезная модель (Полезная модель № 168072 от 19.04.2016, заявка № 2016115291, опубликовано 17.01.2017. бюл. № 2, Мишта В. П.) [2].

В данной полезной модели продолжен вариант защитной перчатки, предназначенной для сотрудников пожарной службы. Данная перчатка состоит из наружной перчатки, для изготовления которой автором предлагается к использованию огнезащитного текстильного материала на основе параарамидных волокон, с дополнительным полимерным слоем, расположенным с внутренней стороны наружной перчатки. Внутреннюю перчатку предлагается изготавливать с применением воздухопроницаемого теплоизоляционного текстильного материала. Автором предлагается вариант изготовления внутренней перчатки из резиноклетчатого материала с двухсторонним дублированием. При этом наружную сторону предлагается выполнить из эластичного материала, с применением нерастяжимой нити, эластомерной нити и нити люрекс, Внутреннюю сторону предлагается изготовить с применением нерастяжимой нити и эластомерной нити. Схематичное изображение перчатки приведено на рисунке 11.

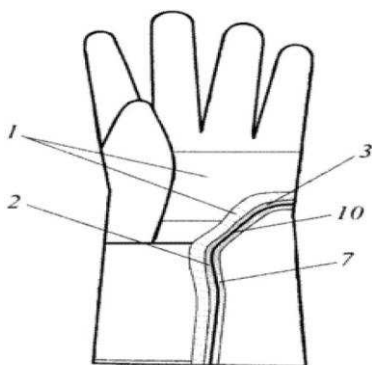


Рисунок 12 - Защитный вкладыш

Данное изделие используется пожарными следующим образом.

Перед работой с источником повышенных температур, сотрудник ФПС надевает защитную перчатку. при этом наружная перчатка (1) обеспечивает защиту от огня, механических и термических повреждений рук. Внутренняя перчатка (2) способствует дополнительной термической защите рук, в связи с наличием слоя эластичного термозащитного трикотажа с резиноктекстильным покрытием, которое способствует отражению тепла, прошедшего верхние защитные слои.

Резиноктекстильный слой (10) также способствует дополнительной механической защите рук. Слой (7) изготовленный из резиноктекстильного материала с использованием хлопчатобумажной нити способствует отводу влаги от рук пожарного, и обеспечивает воздухопроницаемость за счет высокой пористости материала.

С нашей точки зрения, данная конструкция не обеспечивает достаточной термической защиты.

Известен защитный вкладыш от перегрева (патент РФ № 2553005 от 24.07.2014, заявка 2014130864/12, опубл. 10.06.2015 бюл. №16, Енютина Т. А., Афанасьев В. Е., Емельянов Р. Т., Терещенко В. М., Марченкова С. Г., Патрушева Т. Н. [9]. Схема защитного вкладыша изображена на рисунке 12.

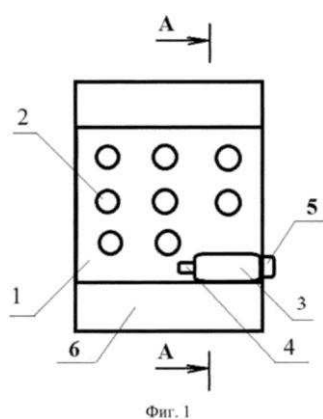


Рисунок 11 - Предложенный вариант перчатки



Защитный вкладыш, принятый за прототип, являющийся съёмной частью одежды пожарного или одним из ее предметов, содержащий многослойный материал, обладающий термическим сопротивлением, отличающийся тем, что вкладыш выполнен, по меньшей мере, с двумя слоями газонепроницаемого материала с возможностью образования между этими слоями герметичного пространства, заполняемого охлаждающим газом, в частности азотом, при этом на одном из слоев или на дополнительной подкладке закреплены пружины из материала с памятью формы, в частности нитинола, имеющие форму плоских спиралей, которые в изотермических условиях свернуты в круг, а в качестве источника охлаждающего газа применен баллончик с азотом, снабженный выпускным клапаном с элементом из материала с памятью формы и захватом, баллончик закреплен между раздвигаемыми посредством пружин слоями с возможностью его извлечения для заправки азотом, при этом по контуру защитного вкладыша выполнены герметичные швы, образующие участок с внутренней сквозной полостью, образованной слоями ткани, в полости герметично установлен упомянутый баллончик с азотом, обращенный выпускным клапаном внутрь пространства между слоями, а захватом наружу, при этом выпускной клапан установлен в горловине баллончика с возможностью автоматического срабатывания при определенном повышении температуры, горловина баллончика снабжена внутренним резьбовым отверстием, в котором установлен ниппель с золотником, снаружи корпус ниппеля закрыт крышкой выпускного клапана, установленной с помощью резьбового соединения, в крышке выполнено выпускное отверстие и закреплена одним концом пружина из нитинола, а на другом конце пружины закреплено с возможностью свободного перемещения в корпусе ниппеля кольцо с опорным элементом, расположенным в центре кольца с возможностью взаимодействия с золотником ниппеля.

Недостатком изобретения, принятого за прототип, является необходимость создания герметичного пространства в защитном вкладыше и наличие баллончика с газом, который необходимо заполнять азотом после использования в рабочих условиях.

Анализ патентов и полезных моделей показал отсутствие аналогичных вариантов и позволил выбрать прототип для монтажа вкладыша, предложенного в данной работе, на основании чего возможно оформление заявки на полезную модель.

### 2.3 Конструкция защитного вкладыша от перегрева

СИЗР пожарного состоят из нескольких слоев для придания необходимых параметров защиты от неблагоприятного воздействия вредных и опасных факторов, возникающих при пожаре. Полезная модель относится к средствам индивидуальной защиты рук, которые являются компонентом БОП обязательным для использования в работе.

Цель разработки полезной модели - повышение уровня безопасности сотрудников противопожарных и аварийно-спасательных подразделений при выполнении работ, связанных с нахождением в контакте с очагами повышенных температур. На рисунке 13 приведен общий вид вкладыша в аксонометрии.

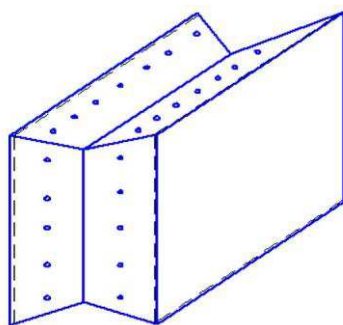
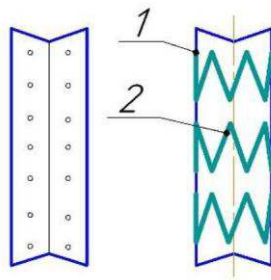


Рисунок 13 - вкладыш от перегрева

На рисунке 14 приведен вид с боку и в разрезе.



1. Слой ткани. 2. Пружина из материала с памятью формы.

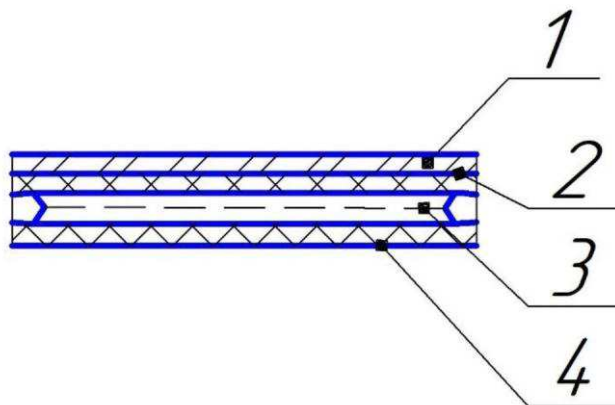
Рисунок 14 - Защитный вкладыш. Вид с боковой части и в разрезе

Согласно полезной модели защитный вкладыш выполнен, по меньшей мере, с двумя слоями 1, с возможностью образования воздушного пространства между этими слоями. Слои 1 изготовлены из специальной ткани, например, арамидной. Для обеспечения притока воздуха предусмотрена перфорация 3 на боковых складках изделия. Оба слоя по размеру соизмеримы с ладонной частью перчатки пожарного. Края слоёв по контуру накладки соединяются стежками типа обметочных. На одном из слоёв или на дополнительной подкладке закреплены прямоугольные пружины 2 с возможностью свободного перемещения (растяжения) и образования пространства между слоями, причём пружины изготовлены из материала с памятью формы, в частности нитинола, которые в изотермических условиях находятся в сжатом состоянии. Для закрепления пружин 2 на ткани могут быть использованы любые известные средства в виде зажимов или термостойкий клей.

При повышении температуры окружающей среды происходит распрямление пружин 2, в результате чего образуется дополнительный теплоизолирующий воздушный слой, который способствует снижению скорости нарастания температуры в точке контакта тела и перчатки. За счет воздухопроницаемости прилегающего к ладони слоя перчатки, дополнительный источник не применяется, воздух поступает и выходит через проницаемые слои. Ткань для изготовления вкладыша должна иметь

достаточную прочность для обеспечения безопасной эксплуатации изделия в случае повреждения пружин 2. После завершения рабочих операций конструкция возвращается в исходное состояние путем нормализации температуры.

Вкладыш устанавливается между защитными слоями перчатки. Вариант установки изображен на рисунке 15.



1. Слой механической защиты.
2. Слой тепловой защиты.
3. Защитный вкладыш от перегрева.
4. Гигиенический слой.

Рисунок 15 Вариант установки вкладыша между слоями

Защитный вкладыш от перегрева имеет простую конструкцию и может быть выполнен любой произвольной формы.

## **3 Теплообмен в щелевых каналах**

### **3.1 Постановка вопроса**

В щелевых каналах теплообмен может развиваться как за счет конвективной теплоотдачи, так и за счет теплопроводности. Ниже рассмотрены теоретические основы обоих видов теплообмена. Целью расчетов является определение величины тепловых потоков, в частности, плотности тепловых потоков  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>.

В требованиях по изготовлению боевой одежды пожарного и СИЗ имеются максимально допустимые параметры, в соответствии с которыми производится подбор материалов и технологий для изготовления спецодежды. Боевая одежда пожарного должна обладать устойчивостью к воздействию теплового потока плотностью не менее 5 кВт/м<sup>2</sup> в течении 240 секунд, а коэффициент теплопроводности не должен превышать значение 0,06 Вт/(м<sup>2</sup>-К).

В работе предлагается ранее не используемый в данном виде изделия метод создания дополнительной воздушной прослойки, представляющей собой щелевой канал между слоями перчатки пожарного. В результате планируется снижение тепловой нагрузки на ладонь человека и появляется возможность увеличения времени работы пожарного в условиях высоких температур. Для подтверждения эффективности данного вкладыша необходимо рассмотреть теплофизические характеристики защитного вкладыша.

### **3.2 Конвективный теплообмен в щелевых каналах**

#### **3.2.1 Общие сведения о конвективном теплообмене**

Конвективный теплообмен-процесс переноса тепловой энергии в потоках жидкости или газа при перемешивании объемов с различными температурами, также присутствует и теплопроводность между соприкасающимися потоками. [10]

Для данного случая важно определить тепловой поток между движущейся средой и поверхностью тела (конвективная теплоотдача). Для данного случая производится расчет по уравнению Ньютона-Рихмана:

$$dQ = a \cdot \Delta t \cdot dF \quad (1)$$

где  $dQ$  - тепловой поток, Вт;

$\Delta t$  - температурный напор - разность температур между потоками и стенкой, К;

$dF$  - поверхность теплообмена,  $m^2$ ;  $a$  - коэффициент теплоотдачи,  $Вт/(m^2 \cdot K)$ .

Из этого следует, что коэффициент теплоотдачи равен плотности теплового потока, при температурном напоре равном единице

$$a = \frac{dQ}{\Delta t \cdot dF} \quad (2)$$

где  $a$  является локальным коэффициентом теплоотдачи.

Средний коэффициент теплоотдачи по всей поверхности нагрева вычисляется по формуле

$$a = \frac{Q}{\Delta t \cdot F} \quad (3)$$

где  $a$ ,  $q$  и  $\Delta t$  - средние по поверхности значения.

Данную величину можно выразить также как среднеинтегральное значение.

Для вертикальной пластины толщиной равной единице

$$a = \int_0^1 a \, dx \quad (4)$$

Значение коэффициента теплоотдачи находится в зависимости от множества факторов:

- Формы и размеров поверхности теплообмена;
- Физических свойств потока;
- Температуры стенки и потока;
- Природы возникновения движения потока и многих других.

Движение потока может возникнуть как за счет собственно конвекции, так и за счет приложения внешних сил, принуждающих поток начать движение. Если существуют силы, принуждающие поток начать движение, о такое движение называют вынужденным (насосы, вентиляторы). Если внешняя сила принуждающая поток к движению отсутствует, то может возникнуть движение в поле земного тяготения. Данное движение возникает из-за неоднородности плотности газа (горячие слои движутся вверх, холодные замещают объёмы, ранее занимаемые газом, вовлеченным в движение вверх). Такое движение называют свободным.

В данной работе рассматривается теплоотдача при свободном движении потока газа вблизи нагретой поверхности теплообмена. Температуру поверхности примем постоянной, то есть  $t_c = \text{const}$ .

Среднюю температуру по сечению можно определить, используя следующее выражение

$$t = \frac{1}{f_0} \int_0^{f_0} t \, df \quad (5)$$

где  $f_0$  - площадь поперечного сечения потока.

Из этого следует что температурный напор будет равен:

$$\Delta t = t_c - t \quad (6)$$

Среднее значение плотности теплового потока найдется расчету баланса энергии жидкости

$$Q_c = \int_0^L q_c u dx \quad (7)$$

где  $u$  - периметр площади поперечного сечения (м), индекс  $c$  относится к значениям на стенке.

Также значение  $Q_c$  можно найти

$$Q_c = G C_p \quad (8)$$

где  $G$  - массовый расход потока (кг/с).

Для местной плотности теплового потока

$$G C_p \frac{dt}{dx} = q_c \quad (9)$$

Соотношения для  $Q_c$  и  $q_c$  можно применять в области сравнительно простых задач, и они будут использованы в данной работе.

### 3.2.2 Система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена

Конвективный теплообмен является сложным физический явлением, которое описывается уравнениями: теплоотдачи, энергии, движения и сплошности.

Уравнение теплоотдачи можно получить из уравнения теплового баланса вблизи стенки.

Тепловой поток, передаваемый путем теплопроводности через пограничный слой, равен тепловому потоку конвективной теплоотдачи на границе стенка - поток



$$-\frac{dn}{dt} = a \cdot At, \quad (10)$$

$$a = \frac{K(it)}{At \cdot \rho n J} \quad (11)$$

тогда

Из этого следует что для того чтобы знать распределение температуры вблизи стенки ( $\Delta$ ), необходимо использовать уравнение энергии.

Уравнение энергии получено с использованием ряда допущений, таких как среда однородна и изотропна, физические свойства постоянны, деформация объема отсутствует.

Используем Первый закон термодинамики для потока

$$dQ = dH + md(\Delta) + mdh_{ТСХ}. \quad (12)$$

В потоке ротор отсутствует, поэтому техническая работа не совершается, соответственно  $dh^\Delta = 0$ .

Скорость потока значительно не изменяется, поэтому изменением кинетической энергии можно пренебречь, соответственно  $d(\Delta) = 0$ .

Из этого следует, что

$$dQ = dH, \quad (13)$$

то есть тепловой поток равен изменению энтальпии.

В свою очередь,  $dQ$  складывается из теплового потока за счет конвекции и теплопроводности

$$dQ = dQ_{\text{конв}} + dQ_{\text{тепл}}, \quad (14)$$

$$dQ = dm C_p A t = d(p \otimes df) C_p A t , \quad (15)$$

$$dQ = \dots \wedge (an)_c df, \quad (16)$$

После преобразований можно получить:

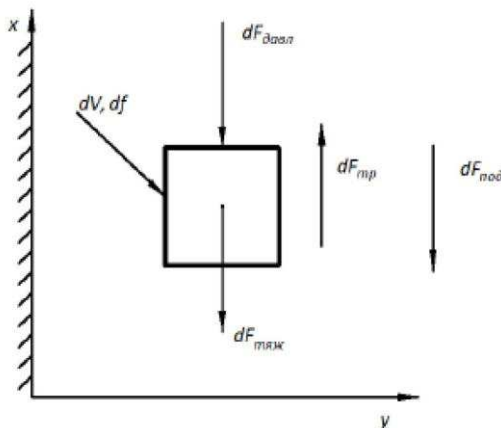
$$\frac{\partial T}{\partial t} + W_y \frac{\partial T}{\partial y} + W_{x^x} \frac{\partial T}{\partial z} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (17)$$

или

$$D^t = a V^2 t \quad (18)$$

Для решения данного уравнения необходимо найти поле скорости вблизи стенки, поэтому следует использовать уравнение движения.

Уравнение движения получено с учетом сил, приводящих поток в движение. На бесконечно малый элемент потока объемом  $dV$  действует ряд сил, принуждающих поток к движению, схема изображена на рисунке 16.



$dF^R$  - сила давления ;  $dF^T$  - сила трения;  $dF^H$  - подъемная сила;  $dF^G$  - сила тяжести.

Рисунок 16 - Силы, приложенные к  $dV$

Принимаем движение одномерным в направлении оси x. Для расчета всех приложенных сил используются следующие выражения

$$dF_{\text{дав}} = p df = -\text{div} p dV = -f f dV, \quad (19)$$

$$dF^{\wedge} = \wedge^{\wedge} df = -\text{div}^{\wedge} \wedge dV, \quad (20)$$

$$dF_{\text{тяж}} = P g dV, \quad (21)$$

$$dF_n^{\wedge} = d(p g p A t f) = p g p A t df = -p g p A t df. \quad (22)$$

Равнодействующая всех приложенных сил будет равняться массе, умноженной на ускорение

$$dF_{\text{рав}} = p dv \frac{Dffx}{dx} \quad (23)$$

$$\frac{Dffx}{dx} = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \frac{d\tau_x}{dy} + \frac{d\tau_x^y}{dy} + \frac{d\tau_x^z}{dz} \quad (24)$$

где  $D^{\wedge}x$  - субстанциональная производная, характеризующая изменения скорости по времени и координатам, которая равна

Тогда для объема  $dV$  будет справедливо следующее выражение

В связи с тем, что данная задача относится к сплошной среде, применяется

$$\frac{Dffx}{dx} = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + g_x - \frac{g^2 M}{dy^2} \quad (25)$$

уравнение сохранения массы или сплошности

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (26)$$

Для стационарных задач  $\rho = \text{const}$ , и если  $p = \text{const}$ , то вид уравнения упрощается до следующего

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (27)$$

Ниже приведен анализ системы дифференциальных уравнений.

### 3.2.3 Анализ системы дифференциальных уравнений

Рассмотрим конвективный теплообмен между поверхностью плоской стенки и потоком газа, расположенной как вертикально так горизонтально.

Физические свойства постоянны, за исключением плотности и коэффициента объемного расширения.

Движение потока происходит в направлении оси  $x$ , то есть в расчетах будет присутствовать только одна составляющая скорости  $v_x$ .

Сила давления весьма незначительна и ею в расчетах можно пренебречь.

Градиент давления исходя из условий можно принять равным нулю.

Вынужденное течение отсутствует, то есть жидкость находясь на значительном расстоянии от пластины неподвижна.

Начало координат располагается у нижней кромки пластины. Ось  $X$  направим вертикально, ось  $Y$  - по нормали к поверхности, график изображен на рисунке 17.

Л i

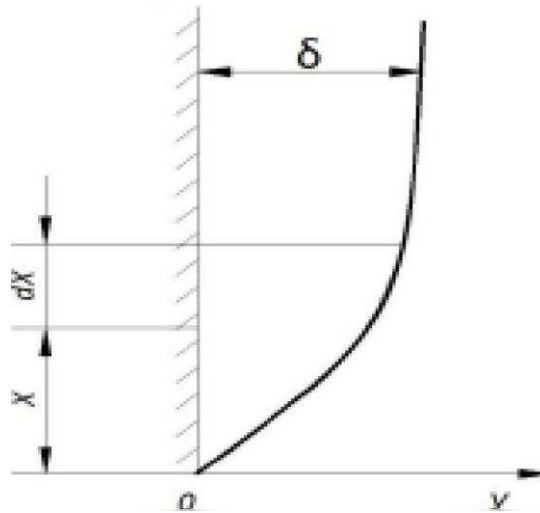


Рисунок 17 - Формирование пограничного слоя

Введем избыточную температуру  $\theta = t - t_c$ , где  $t$  - текущая температура потока;  $t_c$  - температура стенки, которая в данном случае исходя из практических соображений будет постоянной. При этом  $\Delta t = 0$  и общий вид уравнений упрощается.

Уравнение теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\theta_c} \left( \frac{d\theta}{dy} \right)_{y=0} . \quad (28)$$

Можно принять, что температура в пограничном слое изменяется по параболическому закону: что представлено на рисунке 18.

$$\theta = \theta_c \left( 1 - \frac{y}{\delta} \right)^2 , \quad (29)$$

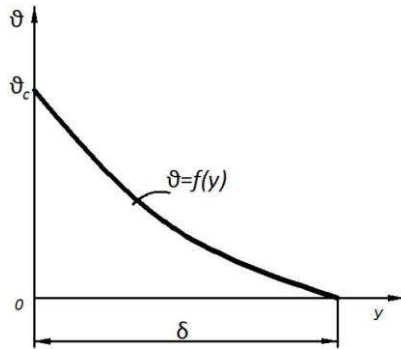


Рисунок 18 - Распределение температуры по толщине пограничного слоя

Уравнение (29) имеет граничные условия: на стенке при  $y=0$   $\theta = \theta_c$ , на внешней границе слоя при  $y = \delta$   $\theta = 0$ .

Формула (29) дифференцируется:

$$\frac{d\theta}{dy} = \frac{2-\theta_c}{\delta} \left( 1 - \frac{\theta}{\theta_c} \right)^2$$

откуда

$$\frac{d\theta}{dy} \Big|_{y=0} = \frac{2-\theta_c}{\delta} \quad (30)$$

С учетом (30), уравнение теплоотдачи (1) получит вид:

$$\alpha = \frac{2\lambda}{\delta} \quad (31)$$

Таким образом, для определения коэффициентов теплоотдачи найти толщину пограничного слоя  $\delta$  следует

Для этого используется уравнение движения:

$$d^2 \& r$$
$$\mathbf{H} \ 2m = \cdot \partial (\mathbf{P} \bar{o} \mathbf{p}),$$

где

$$P = P_0(1 + P\delta) \quad (33)$$

Граничные условия: при  $y=0$   $w_x = 0$ ; при  $y=S$   $w_x = 0$ . В

(33) подставляется  $\delta$  из (29):

$$\frac{d^2 w_x}{dy^2} = -P_0 \gamma \frac{P_0 \delta c}{3} (i-j)^2 = \frac{P_0 \gamma P_0 \delta c}{3} \cdot \frac{K_2}{S^2} \quad (34)$$

Обозначая  $\frac{P_0 \gamma P_0 \delta c}{3} = A$ , уравнение (34) можно записать так:  
 $= -A(1 - 2y^2 + y^4)$ .

Эт

уравнение дважды интегрируется:

$$A \left( y - \frac{2}{3} y^3 + \frac{1}{12} y^5 \right) + C_1 y + C_2 = 0 \quad (35)$$

С учетом граничных условий определяются постоянные интегрирования:

$$C_1 = A - i; \quad C_2 = 0,$$

и уравнение (35) получает вид:

$$w_x = A \left( -y + \frac{2}{3} y^3 - \frac{1}{12} y^5 \right) + (A - i) y \quad (36)$$

Формулу (36) можно исследовать на максимальное значение, для чего достаточно использовать выражение, стоящее в скобках. При этом



$$y = 0,35 = \wedge \tag{37}$$

Среднеинтегральная температура в сечении с использованием (29) равна

Распределение скорости по толщине пограничного слоя приведено на рисунке 19. (38)

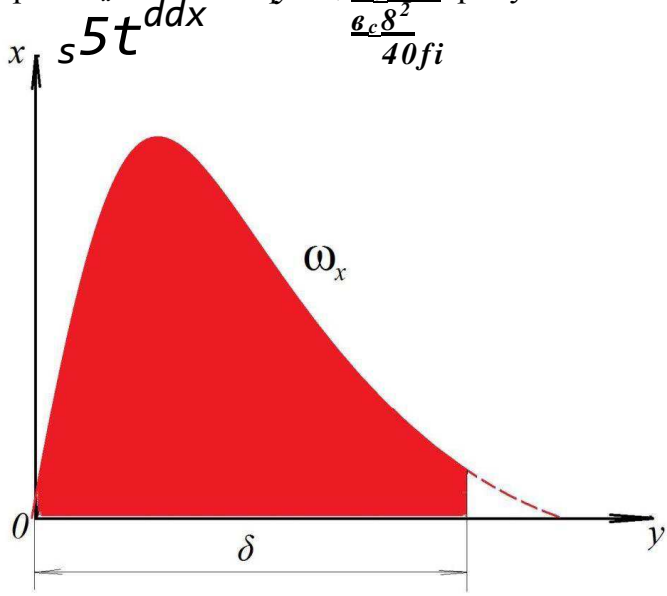


Рисунок 19 - Распределение скорости согласно уравнению (37)

Среднеинтегральная скорость в сечении потока

Для элементарного участка поверхности пластины высотой  $dx$  и протяженностью  $z$  можно сформировать условие теплового баланса: тепловой поток  $Q_k$  передаваемый от поверхности к среде за счет конвективной теплоотдачи, равен тепловому потоку  $Q_p$ , воспринимаемому средой в изобарном процессе, т.е.

$$Q_k = Q_p$$

или

$$dQ_k = dQ_p . \tag{40}$$

Согласно закону Ньютона - Рихмана

$$dQ_k = ad_c dF = ad_c dxz,$$

где  $dF$  - элемент поверхности пластины,  $m^2$ .

С учетом (40)

$$dQ_k = - d_c dx z. \quad (41)$$

В свою очередь,  $dQ_p$  согласно первому закону термодинамики равно произведению изобарной теплоемкости на массовый расход потока и на изменение температуры потока, т.е.

$$dQ_p = Cp dm d. \quad (42)$$

Массовый расход

$dm = d(p_0 M_x S z)$ , где  $d(\delta z)$  - элементарная площадка сечения потока. С

учетом (29)

тогда

$$dm = d \left( \rho_0 \frac{P_0 g p s}{40 \mu} Z \frac{3 p l g P s^2}{40 \mu} z dS, \right)$$

$$dm = d \left( \rho_0 \frac{p l g p - d_c s^2}{40 \mu} Z \frac{3 p 0 \partial P s c}{40 \mu} z S^2 dS, \right)$$

Выражение (41) и (43) подставляют в (43):

(43)

$$\frac{3 \rho l g f_3 V_{cs} 3_{ds}}{40 p} = \frac{6 X_{dx}}{c_p}$$

После интегрирования:

$$\frac{3 \rho l g f_3 \Delta^e 4_{ds}}{160 p} = -x + C. \quad (44)$$

Постоянную  $C$  определяют из условия на нижней кромке пластины: при  $x = 0,5 = 0$ , откуда следует что  $C = 0$ .

Уравнение (44) дает возможность определить толщину пограничного слоя:

$$5 = 4,23^4 \frac{\rho X x}{3 c_p \Delta^e c} \quad (45)$$

Подставив (43) в (32), получим формулу для коэффициента теплоотдачи

$$N_i = 0,473 \frac{\rho \Delta^e M^4}{S - m p x} \quad (46)$$

Это уравнение следует привести к безразмерному виду.

Для приведения уравнения (46) к безразмерному виду обе части умножают на  $\frac{x}{p}$ ; а подкоренное выражение на -

$$\frac{ax}{X} = 0,473 \frac{1^c p^p o U P^{3c \wedge 3} x^4}{X^4 p}$$

$$T = 0,473 \frac{1 \partial N_c x^3 P^c P}{-}$$

Здесь  $\hat{=} Nu$  - критерий Нуссельта;  $X$

$$\frac{\partial p_{\text{сх}}^3}{\partial x^3} - \frac{g x^3}{R} g \nu p^3 \quad \text{Gr - критерий Грасгофа;}$$

$$\nu^2 Pr_c$$

$$\frac{g a}{\rho} \quad \text{Pr - критерий Прандтля.}$$

Таким образом, критериальное уравнение для расчета местных коэффициентов теплоотдачи на вертикальной пластине при свободном движении потока получит вид

$$Nu = 0,473(Gr Pr)^{-0,25}. \quad (47)$$

Получим уравнение для определения среднего коэффициента теплоотдачи. Средний по высоте пластины коэффициент теплоотдачи определяется по формуле:

$$a = \int_0^l X^a dx = \int_0^l X^{cx} \quad 0,25 \quad dx = \frac{4}{3} cl \quad \frac{0,2}{5}$$

тогда расчетное уравнение получит вид

$$Nu = 0,473(Gr Pr)^{-0,25}. \quad (48)$$

В данной работе определялись как местные, так и средние коэффициенты теплоотдачи.

В предлагаемой полезной модели пространство внутри вкладыша может располагаться в любом положении относительно точки отсчета. Рассмотрим два случая: для вертикального и горизонтального расположения щели.

В зависимости от расстояния  $\delta$  между стенками модели движение потока может развиваться по-разному.

При достаточно больших значениях толщины  $\delta$  около стенок формируются не прикасающиеся между собою пограничные слои. На горячей стенке формируется восходящий пограничный слой. Отклонения от данного явления наблюдается на концах щели (рисунок 20).

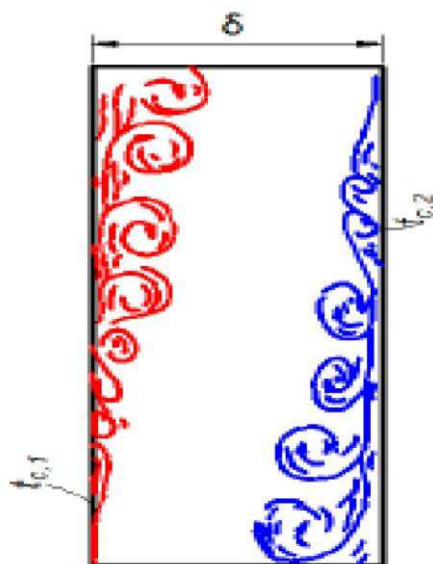
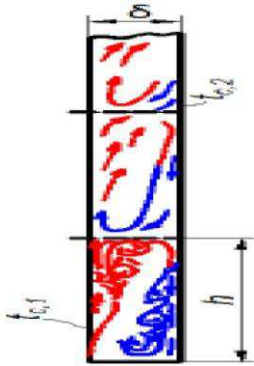


Рисунок 20 - Механизм образования независимых потоков

Расчет теплообмена в данном случае производится по аналогии со случаем свободного движения около вертикальной пластины.

### 3.2.4 Расчет теплообмена при малых значениях $\delta$

При малых значениях  $\delta$  пограничные слои вступают во взаимодействие друг с другом, результатом чего является появление циркуляционных контуров с высотой  $h$  (рисунок 21). Высота контура находится в зависимости от толщины слоя, температуры обеих стенок и физических свойств потока.



$$Q = \frac{\lambda_{\text{экв}} \Delta t_{\text{ср}}}{s} \quad \text{Вт} \quad (49)$$

Рисунок 21М. Механизм образования взаимодействующих потоков

В этом случае расчет теплового потока проводится по уравнению теплопроводности

где  $\lambda_{\text{экв}}$  - эквивалентный коэффициент теплопроводности, Вт/м\*К.

Величину  $\lambda_{\text{экв}}$  можно вычислить по формуле

$$\lambda_{\text{экв}} = \lambda_{\text{к}} \cdot \xi_{\text{к}} \quad (50)$$

где  $\xi_{\text{к}}$  - поправка, применяемая для учета возникновения конвективных токов в пространстве щели. На основе опытных данных имеются следующие рекомендации для применения  $\xi_{\text{к}}$  в расчетах:

- при  $10^3 < (Gr-Pr) < 10^6$ ,  $\xi_{\text{к}} = 0.105^{(Gr-Pr)^{0.3}}$ ;
- при  $10^6 < (Gr-Pr) < 10^{10}$ ,  $\xi_{\text{к}} = (Gr-Pr)^{0.2}$ .

Определяющим размером является толщина слоя  $\delta$ , а определяющей температурой - средняя температура слоя  $t_{\text{ср}} = 0.5 (t_{\text{с1}} + t_{\text{с2}})$ .

Если  $10^3 < (Gr-Pr)$ , то поправка не вносится и  $\lambda_{\text{экв}} = \lambda_{\text{к}}$ .

По данным М. А. Михеева, при значениях  $(Gr-Pr) > 10^3$  допускается использовать формулу

$$S_k = 0,18(Gr Pr)^{0,25}. \quad (51)$$

Теплофизические свойства воздуха приняты из ( ) и представлены в таблице 9.

Таблица 9 - Теплофизические свойства сухого воздуха при  $p=0,0981$  МПа

t, °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\gamma$ , ВТ/(м <sup>2</sup> ·К)	$\nu \cdot 10^{-6}$ , Па·с	$\alpha \cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с	$\lambda \cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
40	1,091	1,00	2,72	19,16	24,8	15,57	0,71
50	1,057	1,00	2,79	19,63	26,3	18,58	0,71
60	1,026	1,01	2,86	20,10	27,6	19,60	0,71
70	0,996	1,01	2,92	20,56	29,2	20,65	0,71
80	0,967	1,01	2,99	21,02	30,6	21,74	0,71

Расчетная формула для определения среднего по высоте коэффициента теплоотдачи

$$Nu=0.473(Gr*Pr)^{0,25}, \text{ где}$$

$$Nu = a \cdot l / X, \text{ и } a = N^M.$$

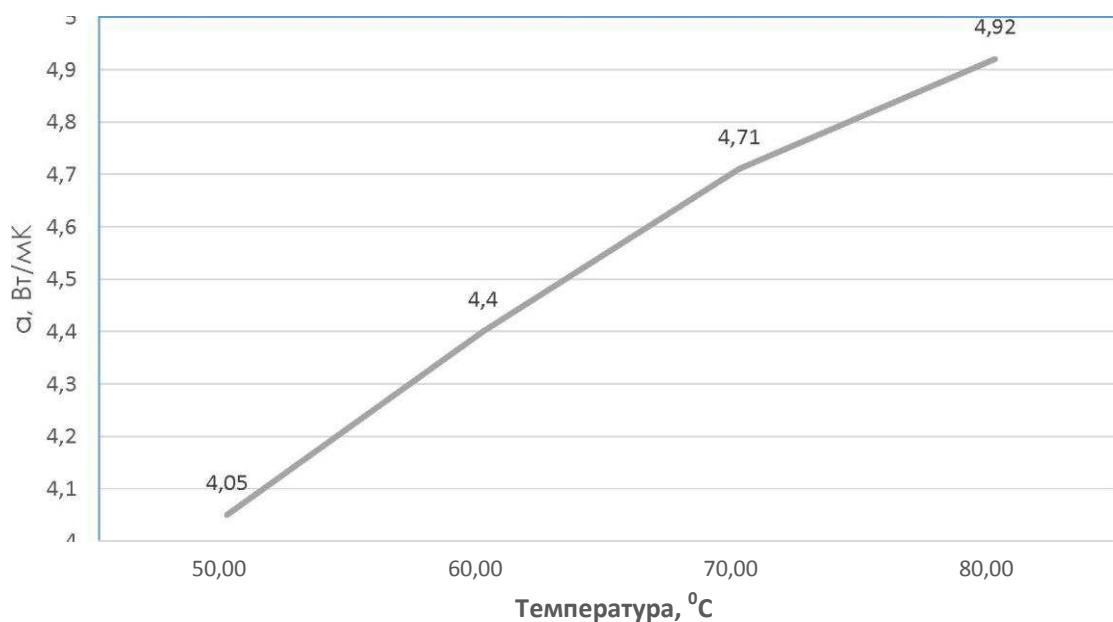
В данном случае высота стенки  $l=0,05$  м. Результаты расчетов приведены в таблице 10.



Таблица 10 - Результаты расчета теплообмена

t, °C	tc, °C	A, $\frac{1}{\text{m} \cdot \text{s}} \cdot \text{K}$	$\nu, 10^{-6} \text{m}^2/\text{c}$	в $10^{-3}$	Pr	Gr $10^4$	Gr Pr $10^4$	Nu	a, Вт/м*К	Вт/м <sup>2</sup>
50	45	2,79	15,57	3.1	0.71	7.84	5.57	7.26	4,05	20,25
60	50	<b>2,86</b>	18,58	3.05	0.71	10.83	7.7	7.88	4,4	44
70	55	2,92	19,60	3	0.71	14.36	<b>10.2</b>	8.45	4,71	70,65
80	60	2,99	20,65	2.96	0.71	17.02	<b>12.1</b>	8.82	4,92	98,4

Ниже на рисунках 22, 23 представлены графики зависимости коэффициента



теплоотдачи и теплового потока от средней разности температур потока.

Рисунок 22 - График зависимости  $a$ , от

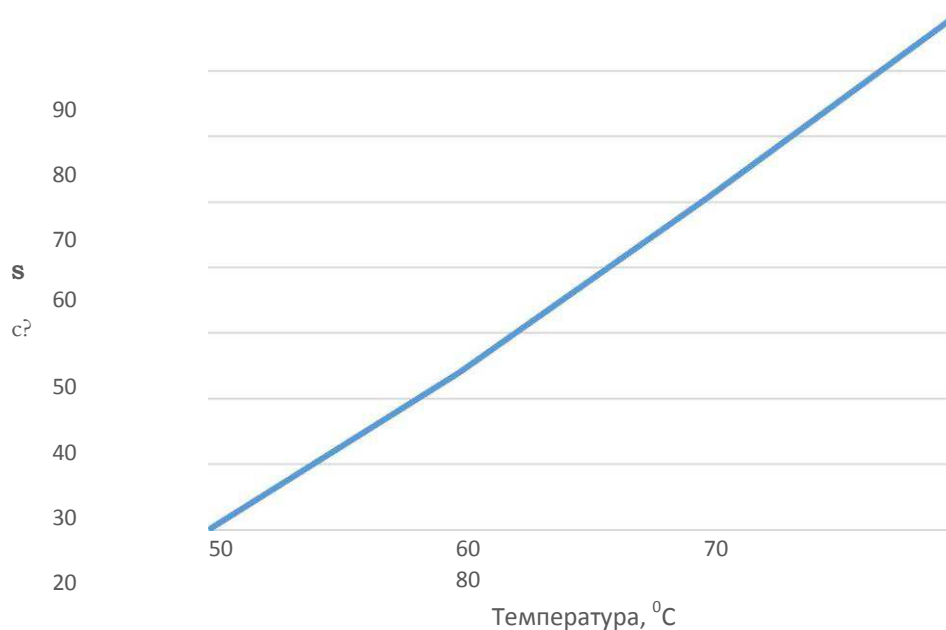


Рисунок 23 - График зависимость q, от t<sub>ср</sub>

### 3.2.5 Общие выводы по результатам расчёта плотности теплового потока по формулам конвективной теплоотдачи и уравнениям теплопроводности

Значения коэффициента теплопроводности потока в слое защитного вкладыша  $\lambda < 0,06$ , Вт/(м К), то есть соблюдается условие, требуемое для боевой одежды пожарных.

Величины плотности тепловых потоков при расчёте теплопереноса по формулам конвективного теплообмена выше значений q, рассчитанных по формулам теплопроводности.

Рекомендуем использовать для расчёта теплопереноса в щелевых каналах при малом значении толщины слоя формулы конвективного теплообмена.

### 3.2.6 Расчет теплового потока по формулам теплопроводности

Для расчета плотности теплового потока проверяется возможность использования уравнения (49).

С этой целью определяется комплекс В

$$B=124*Pr^{0.42}*(0.955+Pr)^{1/5}$$

где в качестве определяющего размера берется толщина слоя 5 (м).

Результаты расчета приведены в таблице 11.

Таблица 11 - Комплекс В

Толщина слоя 5, м	0,003	0,005	0,007
Комплекс В	73700	44220	31585

Значения критерия Грасгофа приведены в таблице 12, причем в качестве определяющего размера принята толщина слоя.

Таблица 12 - Критерий Gr, в зависимости от толщины щели

Толщина слоя, м	Температура, °С			
	40	50	60	70
0,003	16,93	23,4	31,03	36,78
0,005	78,4	108,34	143,64	170,24
0,007	215,14	297,28	394,15	467,14

Для определения характера движения потока, необходимо определить критерии Грасгофа и Прандтля и воспользоваться выражением

$$Gr < B. \quad (53)$$

Так как условия условие соблюдается то расчет возможен по формуле теплопроводности.

Вычисляем значение эквивалентного коэффициента теплопроводности

$$\lambda_{\text{экв}} \lambda_{\text{к}},$$

где  $\delta k$  - поправочный коэффициент.

$$\delta k = 0,18(\text{Gr Pr})^{0,25} \quad (54)$$

Результат вычисления поправочного коэффициента  $\delta k$  приведены в таблице 13.

Таблица 13 - Поправочный коэффициент  $\delta k$

Значение	Температура, °C			
	40	50	60	70
$\delta = 0,003 \text{ м}$				
Gr-Pr	12,02	16,61	22,03	26,11
$\delta k$	0,335	0,363	0,39	0,406
$\delta = 0,005 \text{ м}$				
Gr-Pr	55,64	76,92	101,98	120,87
$\delta k$	0,49	0,53	0,57	0,597
$\delta = 0,007 \text{ м}$				
Gr-Pr.	152,14	211,07	279,85	331,67
$\delta k$	0,63	0,686	0,736	0,768

Результаты вычисления плотности теплового потока приведены в таблице 14.

Таблица 14 - Плотность теплового потока

Значение	Температура, °С			
	40	50	60	70
5=0,003 м				
$\chi_{\text{ЭКВ}} 10^{-3}$ (Вт/мК)	9,11	10,12	11,15	11,85
$q$ , Вт/м <sup>2</sup>	30,36	33,73	37,16	39,5
5=0,005 м				
$\chi_{\text{ЭКВ}} 10^{-3}$ (Вт/мК)	13,32	14,78	16,3	17,43
$q$ , Вт/м <sup>2</sup>	26,64	28,56	32,6	34,86
5=0,007 м				
$\chi 10^{-3}$ (Вт/мК)	17,13	19,14	21,05	22,43
$q$ , Вт/м <sup>2</sup>	24,47	27,34	30,07	32,04

### 3.2.7 Выводы к «Расчёту тепловых потоков по формулам теплопроводности»

Эквивалентный коэффициент теплопроводности возрастает с увеличением температуры.

Плотность теплового потока увеличиваются с ростом температуры.

### 3.2.8 Оценка влияния пружин на теплообмен в щелевом пространстве

Пружина имеет квадратное сечение со стороной 0,001 м и длиной  $l = 0,01$  м.

Площадь пружины

$$F = (0,001)^2 \cdot 0,01 = 10^{-5}, \text{ м}^2.$$

$$\text{Общая площадь пяти пружин } F_{\text{общ}} = 5 \cdot 10^{-5}, \text{ м}^2.$$

Коэффициент теплоотдачи от пружин к воздуху слоя  $a = 7$ , Вт/(м<sup>2</sup> К). Тепловой поток за счёт теплоотдачи от пружин равен

$$Q = a At \text{ Бобщ, Вт,} \quad (55)$$

тогда,

$$Q = 7 \cdot 10510^{-5} = 0,175 \text{ Вт.}$$

Тепловой поток в слое равен:

$$Q = 7 \cdot 10 \cdot 0,05 = 3,5 \text{ Вт.}$$

Доля теплового потока от пружин составляет  $(0,175/3,5) \cdot 100 \sim 5$ , %.

Таким образом, даже приблизительная оценка тепловых потоков от пружин (вклад пружин в общий теплообмен) позволяет сделать вывод, что наличие пружин не оказывает существенного влияния на теплоперенос между слоями защитного вкладыша.

### **3.2.9 Расчёт максимального давления, которое выдерживают пружины**

В результате расчёта максимальной нагрузки на пять пружин (On-line «Расчёт пружин», Сланцевский завод пружин) [11] получено, что  $F = 35,88$  Н.

Тогда давление, которое оказывают пружины на поверхность слоя защитного вкладыша составит:

$$P = 35,88 / (0,05)^2 = 114352 \text{ Па} = 1,4352 \text{ бар.}$$

Таким образом, пружины создают малое механическое напряжение и позволяют свободно использовать их в процессе работы на очаге пожара.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Известно, что при тушении очагов возгорания, травмы пожарных возникают примерно в 20% случаев в результате термических ожогов. Поэтому совершенствование конструкции средств индивидуальной защиты рук является актуальной задачей.

В работе проведен анализ существующих конструкции боевой одежды пожарных и приняты к исполнению теплотехнические требования, предъявляемые к БОП. Особое внимание уделено средствам индивидуальной защиты рук пожарного (СИЗР).

Проведен патентный поиск, выполнен анализ устройств, который позволил выявить недостатки предлагаемых образцов. Кроме того, принят прототип защитного вкладыша от перегрева, выбран вариант монтажа защитного вкладыша в перчатки пожарного.

В защитном вкладыше используются пружины из материала с памятью формы - нитинола. В работе приведены основные характеристики этого сплава.

Разработана конструкция защитного вкладыша, состоящая из двух слоев материала, например, параарамидной ткани, между которыми установлены пружины из нитинола.

Проведены теплотехнические расчеты плотности тепловых потоков и коэффициенты теплопроводности. Результаты расчета позволяют сделать вывод, что тепловые характеристики защитного вкладыша находятся в норме.

На конструкцию защитного вкладыша выполнена заявка для подачи в Федеральный институт патентной собственности. Защитный вкладыш прост в конструкции и изготовлении, имеет малую стоимость. Его можно применить для монтажа в любой части БОП. Кроме того, его можно использовать в средствах индивидуальной защиты металлургической и нефтяной промышленности.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

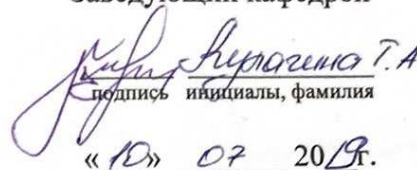
1. СТО 4.2-07-2014 Система менеджмента качества. Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной деятельности. - Введ. 09.01.2014. - Красноярск: СФУ, 2014. - 60 с.
2. Пат. модель № 168072 от 19.04.2016 заявка № 201611529, опубликовано 17.01.2017. бюл. № 2, Мишта В. П.
3. ГОСТ Р 53264-2009 Техника пожарная. Специальная защитная одежда пожарного. Общие технические требования. Методы испытаний. - Введ. 01.05.2009. - Москва: Стандартинформ, 2009. - 38с.
4. НПБ 161-97 Специальная защитная одежда пожарных от повышенных тепловых воздействий. Общие технические требования. Методы испытаний. - Введ. 01.12.2007. - Москва: Типография ВНИИПО МВД России, 1998. - 66с.
5. НПБ 182-99 Пожарная техника. Средства индивидуальной защиты рук пожарных. Общие технические требования. Методы испытаний. - Введ. 01.09.1999. - Москва: Типография ВНИИПО МВД России, 1999. - 27с.
6. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник. М.: Атомиздат. 1968.- 484 с.
7. Пат. № А41D 19/05 (2006.01) RU 172694 U1 заявка 2016144545 от 14.11.2016, бюл. 20 от 19.07.2017. Смирнова Е. Л., Лукашевский А. В., Шемаков А. В.
8. Пат. модель № 116050 от 21.02.2012 заявка № 2012106154, опубликовано 20.05.2012. бюл. №14, Мефокова О. А, Фадеев О. А.
9. Пат. № 2553005 от 24.07.2014, заявка 2014130864/12, опубл. 10.06.2015 бюл. №16, Енютина Т. А., Афанасьев В. Е., Емельянов Р. Т., Терещенко В. М., Марченкова С. Г., Патрушева Т. Н.
10. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Изд-во «Высшая школа». 1967.- 487 с.
11. Расчёт пружин on-line. Сланцевский завод пружин. - Режим доступа: <https://www.mirpruzhin.ru/on-line-raschet/>

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

Кафедра инженерной экологии и безопасности жизнедеятельности

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой

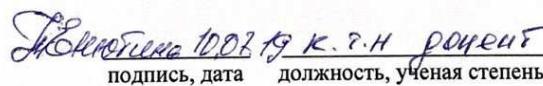
  
подпись инициалы, фамилия  
«10» 07 2019.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

по направлению подготовки 20.03.01. Техносферная безопасность

«Усовершенствование элементов боевой одежды пожарных»  
тема

Руководитель

  
подпись, дата должность, ученая степень

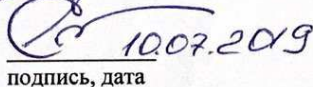
  
инициалы, фамилия

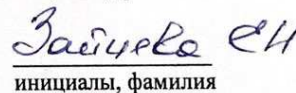
Выпускник

  
подпись, дата

  
инициалы, фамилия

Нормоконтролер

  
подпись, дата

  
инициалы, фамилия

Красноярск 2019