

**Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и
ликвидации последствий стихийных бедствий
Донецкой Народной Республики**

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГОРНОСПАСАТЕЛЬНОГО ДЕЛА, ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
И ГРАЖДАНСКОЙ ЗАЩИТЫ «РЕСПИРАТОР»**

На правах рукописи

Завьялов Геннадий Вячеславович

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ПРОТИВОТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ СПАСАТЕЛЯ
С ОХЛАЖДЕНИЕМ ПРОТОЧНОЙ ВОДОЙ**

Специальность 05.26.01 – охрана труда

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Донецк – 2019

Работа выполнена в Государственном научно-исследовательском институте горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР, г. Донецк.

Научный руководитель: доктор технических наук, старший научный сотрудник **Мамаев Валерий Владимирович**, заместитель директора института по научной работе Государственного научно-исследовательского института горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР

Официальные оппоненты:

Брюханов Александр Михайлович
доктор технических наук, профессор,
директор Государственного учреждения
«Макеевский научно-исследовательский институт
по безопасности работ в горной промышленности»

Марийчук Иван Филиппович
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Строительство зданий, подземных сооружений и
геомеханика» ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ» МОН ДНР

Ведущая организация:

ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ» МОН ДНР

Защита состоится «18» декабря 2019г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.008.01 при ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» по адресу: 283001, г. Донецк, Артема, 58, II учебный корпус, к. 203. Тел. факс: +38 (062) 304-30-55, E-mail: donntu.info@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» по адресу: 283001, г. Донецк, Артема, 58, II учебный корпус, адрес сайта университета <http://donntu.org>.

Автореферат разослан «__» _____ 2019г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.008.01,
доктор технических наук, профессор

И.А. Бершадский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Пожары, как неконтролируемое горение веществ и материалов, уничтожают значительные материальные ценности, создают угрозу для жизни и здоровья людей, наносят значительный ущерб окружающей среде.

Особую опасность пожары представляют личному составу пожарно-спасательных подразделений Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики (МЧС ДНР).

Анализ результатов специальной защитной одежды применяемой для защиты личного состава показал, что пожарно-спасательные подразделения МЧС ДНР в должной мере не оснащены высокоэффективной противотепловой спецодеждой. В частности это относится к экипировке с активным охлаждением организма спасателя, которая предопределяет полную безопасность личного состава, выбор стратегии, тактики локализации и тушения пожаров с повышенным тепловым воздействием.

Отсутствие на оснащении пожарно-спасательных подразделений МЧС противотепловой одежды с активным охлаждением организма существенно влияет на безопасность личного состава при ведении аварийно-спасательных работ и тушении пожаров. Снижает время пребывания в зоне повышенного температурного воздействия, особенно в летний период времени, что приводит к перегреванию организма, потере здоровья, большим затратам на лечение и выплатам по профессиональному заболеванию.

Допустимая продолжительность работы спасателя при выполнении работы средней тяжести (разведка пожара, работа со стволом) в теплозащитном костюме с респиратором при внешних тепловых потоках 10,5; 7,0 и 4,2 кВт/м² должна составлять не более 10, 15 и 20 мин, при тяжелой работе (передвижение со стволом, перенесение груза, разборке конструкций и т.п.) при этих же условиях соответственно не более 8, 12 и 16 мин. В теплоотражательном костюме в зоне с температурой воздуха окружающей среды до 650 °С и внешним тепловым потоком (35...59) кВт/м² продолжительность работы составляет не более 13 мин, а при выполнении тяжелой работы в таких условиях – не более 9 мин. При этом спасатель должен постоянно изменять ориентацию тела относительно фронта пламени в пределах 180°. Это может привести к тому, что поставленная задача для спасателей останется не выполненной.

В связи с вышеизложенным исследования, по созданию противотепловой защиты с охлаждением проточной водой из пожарного рукава, при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ в условиях повышенных тепловых воздействий приобретают особую актуальность.

Следовательно установление закономерностей нестационарных теплообменных процессов в системе «окружающая среда – противотепловой

костюм – организм спасателя», для обоснования параметров противотепловой защиты с водяным открытого цикла, которое обеспечивает повышение безопасности труда при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ (в условиях высоких внешних тепловых воздействий) является актуальной научно-технической задачей.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом работы Государственного научно-исследовательского института горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР на 2016-2017 годы по теме № 11616013 «Разработать облегченный теплозащитный костюм для спасателя с водяным охлаждением открытого цикла» при непосредственном участии автора в качестве научного руководителя работы.

Цель работы – раскрытие закономерностей нестационарных теплообменных и гидравлических процессов в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – организм спасателя». Это позволит обеспечить повышение безопасности труда при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ в условиях повышенных тепловых воздействий.

Для достижения поставленной цели возникла необходимость решения следующих основных задач:

– *провести* анализ условий работы и тактических приемов тушения пожаров на объектах с высоким уровнем теплового излучения;

– *выполнить* исследования процесса воздействия на организм спасателя лучистого потока от очага пожара и выбор расчетной схемы противотепловой защиты с охлаждением проточной водой;

– *разработать* математическую модель нестационарных теплообменных процессов в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – организм спасателя» для исследования температурных полей в пододежном пространстве и определения параметров противотепловой защиты с охлаждением проточной водой;

– *экспериментально определить* значения энергетических показателей при различной степени тяжести выполняемой спасателем работы в противотепловой защите;

– *обосновать* параметры и создать противотепловую защиту спасателя с охлаждением проточной водой, обеспечивающую повышение безопасности его труда при ведении работ в условиях повышенных тепловых воздействий.

Объект исследований – нестационарные теплообменные и гидравлические процессы в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – организм спасателя».

Предмет исследований – конструктивные и эксплуатационные параметры противотепловой защиты с водяным охлаждением тела спасателя, обеспечивающей повышение безопасности его труда при тушении пожаров и

проведении аварийно-спасательных работ в условиях повышенных тепловых воздействий.

Методы исследований.

При выполнении диссертационной работы использован комплексный подход, содержащий анализ и обобщение результатов ранее полученных различными другими авторами, теоретические и экспериментальные методы. Теоретические методы использованы при определении тепловых лучистых потоков от очага пожара, падающих и проникающих в пододежное пространство противотепловой защиты с водяным охлаждением и распределении температуры в ее слоях, разработке математической модели нестационарных теплообменных процессов и теплового баланса в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – организм спасателя» с использованием основных законов термодинамики, теплопроводности и гидравлики; теоретико-экспериментальные методы – при определении энергозатрат с различной тяжестью работ спасателей; экспериментальные методы – при определении параметров противотепловой защиты в лабораторных и полигонных условиях с использованием методов математической обработки статистических данных.

Положения, выносимые на защиту:

1. *Зависимости* для определения мощности тепловых лучистых потоков, воздействующих на спасателя от очага пожара, с учетом расстояния до него, площади и температуры очага пожар, коэффициента облучения, величины лучистого потока, падающего и проникающего через наружный теплоотражающую оболочку противотепловой защиты.

2. *Математическая модель* нестационарных теплообменных в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – организм спасателя», учитывающая воздействующие на наружную поверхность костюма и проникающие через него тепловые потоки (температуры) от очага пожара, теплообмен между теплозащитными слоями с воздушной прослойкой, телом спасателя и системой охлаждения проточной водой.

3. *Противотепловая защита* с принципиально новым способом охлаждения – проточной по поливинилхлоридным трубкам водой, подаваемой из пожарного рукава при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ, использование которой позволит повысить безопасность труда спасателя при выполнении работ в условиях высоких эрготермических нагрузок.

Научная новизна полученных результатов состоит в том, что впервые:

1. *Установлены* зависимости интенсивности тепловых лучистых потоков при одинаковом расстоянии до очага пожара линейного характера от величины площади горения, а также отношения падающего на наружную поверхность теплоотражательного слоя и проникающего через него потоков непропорционально увеличиваются в зависимости от температуры очага пожара.

2. *Разработана* математическая модель нестационарных теплообменных в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – организм спасателя» в которой учтены воздействующие на наружную поверхность костюма и

проникающие через него тепловые потоки (температуры) от очага пожара, теплообмен между теплозащитными слоями с воздушной прослойкой, телом спасателя и системой охлаждения проточной водой, что позволило установить максимальное время противотепловой защиты с водяным охлаждением (при коэффициенте черноты его теплоотражательного слоя равен 0,2, расстояние между трубками не превышающим 30 мм, минимальный их внутренний диаметр не более 3 мм, расход воды не менее 0,24 м³/ч и давление на входе – 0,4 МПа), оно составляет не менее 60 минут.

3. *Экспериментально* доказано, что при одинаковых параметрах воздуха окружающей среды, физической нагрузке спасателя время защитного действия созданной противотепловой защиты по сравнению с используемыми подразделениями МЧС костюмами ТК-800 больше чем в четыре раза выше, и в превышает аналогичный параметр для ПТК–300 горноспасателей с уменьшением массы во втором случае в 1,3 раза.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит *разработке математической модели* нестационарных теплообменных в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – организм спасателя» в которой учтены воздействующие на наружную поверхность костюма и проникающие через него тепловые потоки (температуры) от очага пожара. Определены энергозатраты спасателей при выполнении ими работ различной степени тяжести. *Обоснованы параметры и создана противотепловая защита* с охлаждением проточной водой с более высоким временем защитного действия по сравнению с существующими для спасателей и горноспасателей аналогичного назначения.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются применением классических основ и законов термодинамики при исследовании процесса воздействия теплового лучистого потока от очага пожара на спасателя; теории теплопроводности – нестационарных процессов тепломассопереноса в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – организм спасателя»; гидродинамики при определении параметров водяного охлаждения и физиологии человека – энергозатрат спасателей; использованием при испытаниях противотепловой защиты в лабораторных и полигонных условиях современной метрологически поверенной контрольно-измерительной техники; удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, максимальная относительная погрешность которых не превышает 11%.

Личный вклад соискателя состоит *в проведении анализа* состояния проблемы, *формулировании* цели и основных задач исследований, научных положений и выводов; *разработке* математической модели нестационарных процессов тепломассопереноса в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – организм спасателя»; *разработке* конструкции и изготовлении противотепловой защиты; *проведении* экспериментальных исследований в лабораторных и полигонных условиях, в том числе в качестве испытателя-добровольца; обобщении и систематизации результатов исследований.

Вклад автора в работы, опубликованные в соавторстве. В научных работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежат: [1] – постановка задачи исследований, решение уравнения теплопроводности, анализ и обобщение полученных результатов; [2,12] – постановка задачи исследований, выбор модели очага пожара, определение тепловых потоков в зависимости от их расстояния, площади пожара и максимальной температуры горения; [3, 5, 8] – разработка методики и участие в проведении исследований, обработка данных экспериментов, анализ и обобщение результатов графических и аппроксимирующих зависимостей энергетических показателей спасателей, определение параметров противотепловой защиты; [9] – анализ состояния вопроса, описание средств комплексной противотепловой защиты спасателей при работе в условиях высоких температур; [11] – отличительные признаки на полезную модель теплозащитного костюма.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на Международных научно-практических конференциях: «Надзвичайні ситуації: безпека та захист» (Черкаси, 2015), «Инновационное развитие горнодобывающей отрасли» (Кривой Рог, 2016), «Промышленная безопасность и вентиляция подземных сооружений в XXI столетии» (Донецк, 2015), Первая Республиканская научная конференция «Современное состояние и перспективы дальнейшего развития системы гражданской обороны Донецкой Народной Республики» (Донецк, 2017), XII Международная научно-практическая конференция, посвященная Году гражданской обороны, Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 15 научных работах, из них 8 статей в специализированных научных изданиях, 5 – тезисов докладов в материалах научных конференций, 1 – монография, 1 – патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 102 наименований на 11 страницах. Работа изложена на 140 страницах машинописного текста, из них - 126 страниц основного текста, 54 рисунка и 28 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту и их новизна.

Первая глава посвящена анализу условий и тактических приемов тушения пожаров на объектах с высоким уровнем теплового воздействия, эргономических нагрузок воздействующих на спасателей при тушении пожаров и во время проведения аварийно-спасательных работ, существующих способов и технических средств индивидуальной противотепловой защиты пожарно-спасательных подразделений, методов определения теплового состояния

спасателя и нормативов работы при различных нагрузках, на основании которых определена актуальность темы работы.

Профессия спасателя является одной из наиболее опасных в перечне профессионального риска. Это связано с тем, что тушение пожаров при высоких температурах, влажности, задымленности атмосферы, зачастую при значительных физических нагрузках, нервном напряжении, другими словами при высоких эрготермических и психоэмоциональных нагрузках спасателя.

В настоящее время пожарно-спасательные подразделения применяют теплоотражательные и теплозащитные костюмы с временем защитного действия при температуре окружающей среды 200°C не менее 16 мин и 10 мин соответственно, что является недостаточным для тушения сложных пожаров, не обеспечивая при этом необходимую безопасность и эффективность спасателя, а иногда выполнения поставленных задач.

Отсутствие на оснащении пожарно-спасательных подразделений МЧС одежды с противотепловой защитой с активным охлаждением нередко приводит к потере здоровья и жизни спасателей, большим материальным затратам, в том числе на лечение и выплаты по профессиональному заболеванию.

Большой вклад в разработку, создание и внедрение средств индивидуальной противогазотепловой защиты человека и спасателей, с использованием водолеяющих охлаждающих элементов, внесли ученые и конструкторы: Землянский И.Я., Рыбалко А.П., Карпекин В.В., Вольский, В.А., Волохов И. И., Полшков Н.Я., Диденко Н.С., Марийчук И.Ф., Положий В.О., Клименко Ю.В., Гаврилко А.А., Онасенко А.А., Воронов П.С. и др.

Однако, эти средства защиты требуют больших материальных и энергетических затрат на приобретение и обслуживание морозильных установок, теплоизолирующих контейнеров, а также периодического выхода спасателя из зоны повышенных температурных воздействий для замены используемых охлаждающих элементов другими - в замороженном виде. Поэтому в качестве хладагента в противотепловой защите спасателя целесообразно использовать проточную воду из пожарного рукава, применяемую при тушении пожаров.

Во второй главе *изложены результаты* теоретических исследований процесса воздействия на спасателя теплового лучистого потока от очага пожара, а также нестационарных теплообменных и гидравлических процессов в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – организм спасателя».

Разработана общая методика в виде структурной схемы и основные методы теоретических и экспериментальных исследований для решения поставленных задач.

Основной технической характеристикой противотепловой защиты является время защитного действия (продолжительность работы спасателя), которое функционально можно представить в виде

$$\tau = f_1(q, x, k_0, q_{\text{п}}, q_{\text{к}}, \varepsilon_{\text{к}}, \Theta_0, n_i, \varepsilon_i, \lambda_i, c_i, \rho_i, Q_{\text{м}}), \quad (1)$$

где: q – удельный тепловой лучистый поток очага пожара, кВт/м²; x – расстояние от очага пожара до спасателя, м; k_0 – коэффициент облучения; $q_{\text{п}}$, $q_{\text{к}}$ – удельные тепловые потоки, падающие на наружную поверхность теплоотражающей оболочки костюма спасателя и проникающие через нее, кВт/м²; $\varepsilon_{\text{к}}$ – степень черноты наружной поверхности костюма; Θ_0 – температура воздуха окружающей среды, К; n_i – количество теплозащитных слоев внутреннего комбинезона, ед.; ε_i – степень черноты материала слоев; λ_i – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); c_i – теплоемкость, кДж/(кг·К); ρ_i – плотность материала слоев, кг/м³; $Q_{\text{м}}$ – тепловой поток от тела спасателя, Вт.

Определены воздействующие на спасателя в одежде тепловые лучистые потоки от очага пожара и окружающей его сферической оболочкой, считая ее абсолютно черной. Используя законы Бугера, Ламберта и Стефана-Больцмана, установлена зависимость теплового лучистого потока q от расстояния, площади очага пожара, максимальных температур, а также допустимое расстояние, на которое можно приблизиться спасателю к фронту пламени пожара без средств противотепловой защиты (рисунок 1).

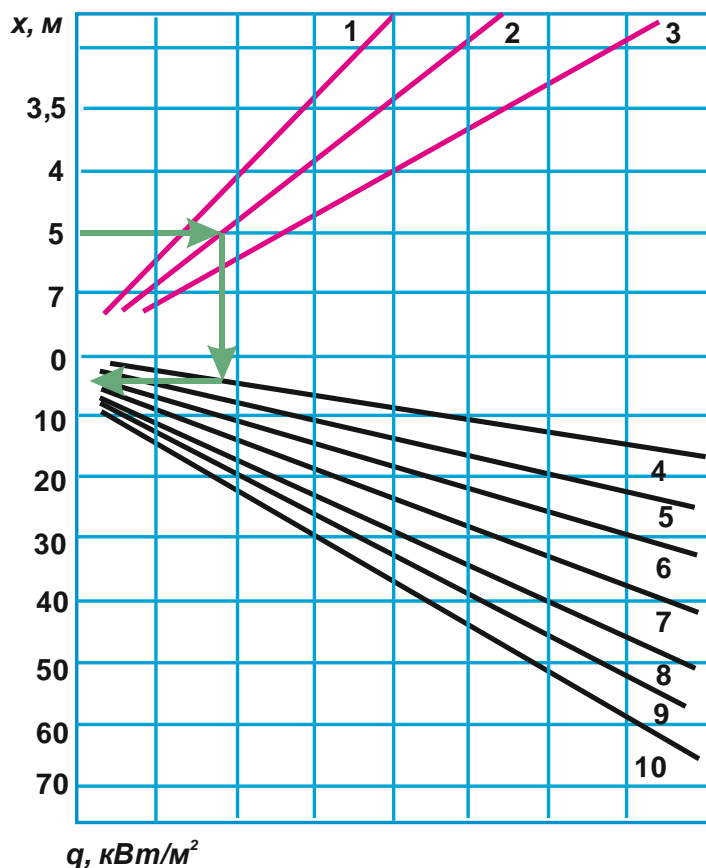


Рисунок 1 – Номограмма для определения теплового лучистого потока q в зависимости от расстояния (x) до фронта пламени пожара, его площади F и максимальной температуры горения Θ_{max} : 1, 2, 3 – 1273, 1373, 1473 °К; (6...10) – $F = 6...20 \text{ м}^2$.

На стадии полного развития пожара зависимости для падающего теплового лучистого потока q_{Π} и поглощенного костюмом теплового потока q_{κ} имеют вид

$$q = \varepsilon \sigma \Theta_{\max}^4; \quad q_{\Pi} = \kappa_0 q; \quad q_{\kappa} = \varepsilon_{\kappa} \sigma (\kappa_0 \Theta_{\max}^4 - \Theta_0^4); \quad (2)$$

$$\kappa_0 = 0,2628 \exp(-0,6836 \bar{x}); \quad \bar{x} = x / \sqrt{F}.$$

Выражения для удельных тепловых лучистых потоков q_{Π} и q_{κ} , а также полученные результаты (рисунок 2) и их аппроксимирующие зависимости использованы в дальнейшем для исследований нестационарных процессов тепломассопереноса в пододежном пространстве противотепловой защиты с водяным охлаждением открытого цикла.

При разработке математической модели нестационарных теплообменных и гидравлических процессов в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – организм спасателя» принята схема охлаждения спасателя в костюме при поступлении в гидравлическую систему проточной воды из пожарного рукава, подающего ее на тушение пожара (рисунок 3).

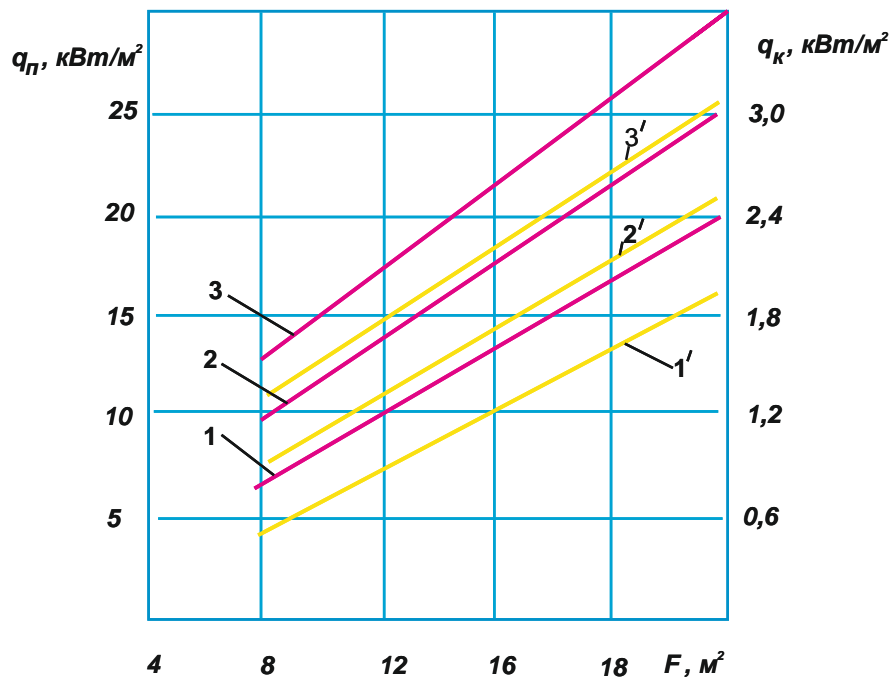


Рисунок 2 – Зависимости падающего q_{Π} (1, 2, 3) и поглощенного костюмом q_{κ} (1', 2', 3') удельных тепловых лучистых потоков от площади пожара F , максимальной температуры горения Θ_{\max} на расстоянии 5 м от фронта развитого пожара при степени черноты $\varepsilon_{\kappa} = 0,1$ и начальной температуры $\Theta_0 = 303$ °К (30 °С): 1, 1': 2, 2': 3, 3' – $\Theta_{\max} = 1273, 1373, 1473$ °К, $q = 150, 200, 270$ кВт/м² соответственно

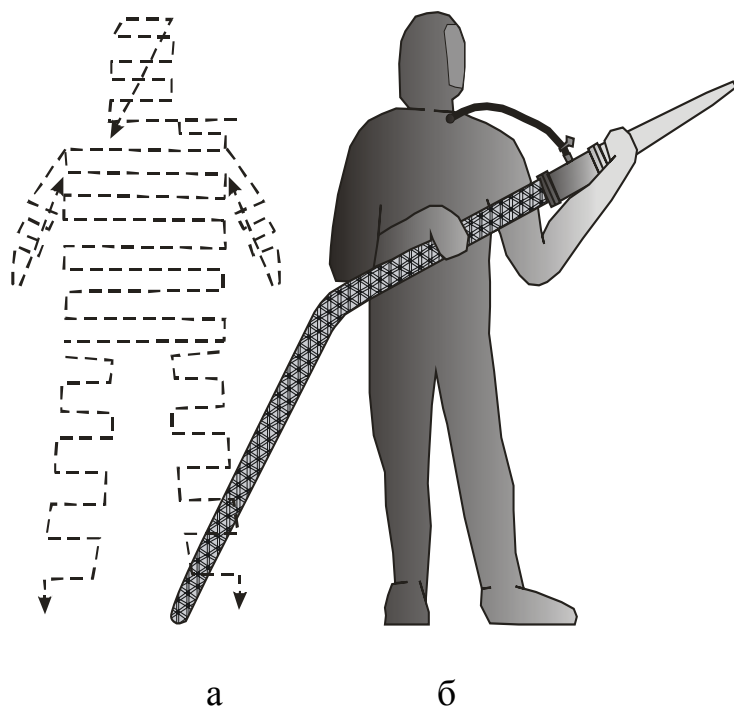


Рисунок 3 – Схема водяного охлаждения противотепловой защиты спасателя:

а – направление движения воды по трубкам внутреннего комбинезона водяного охлаждения из пожарного ствола и ее движение по трубкам; б – отбор проточной воды из пожарного рукава

В данном случае наиболее рациональным является противотепловая защита, состоящая из наружной теплоотражающей оболочки и внутреннего теплозащитного комбинезона с водяным охлаждением, воздушной прослойки между ними, обладающий простотой конструктивного и технологического исполнения, минимальной массой и максимально возможным временем защитного действия при ведении работ спасателем в условиях высоких тепловых воздействий. Расчетная схема противотепловой защиты представлена на рисунке 4, при этом материалы его теплозащитных слоев выбраны с минимальными коэффициентами теплопроводности и черноты.

При исследовании нестационарных тепловых процессов уравнение теплопроводности в декартовых координатах имеет вид

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{C_p \rho} \nabla^2 \theta, \quad (3)$$

где θ – температура; °С; t – время, с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); C_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С); ρ – плотность, кг/м³; ∇ – оператор Лапласа.

Для решения уравнения (3) использован метод конечных элементов с граничными условиями первого, второго и третьего рода для различных слоев (рисунок 5) и обобщенный закон Стефана-Больцмана.

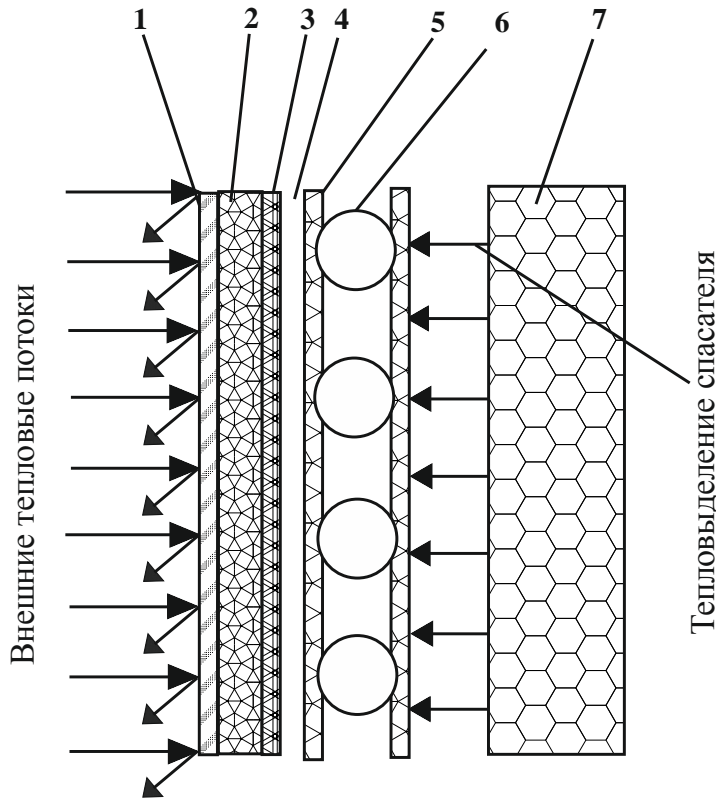


Рисунок 4 – Расчетная схема противотепловой защиты: 1 – наружный слой с металлизированным отражающим покрытием; 2 – теплозащитный слой; 3 – внутренний слой; 4 – воздушная прослойка; 5 – слой оболочки водяного охлаждения; 6 – трубки с водяным охлаждением; 7 – тело спасателя

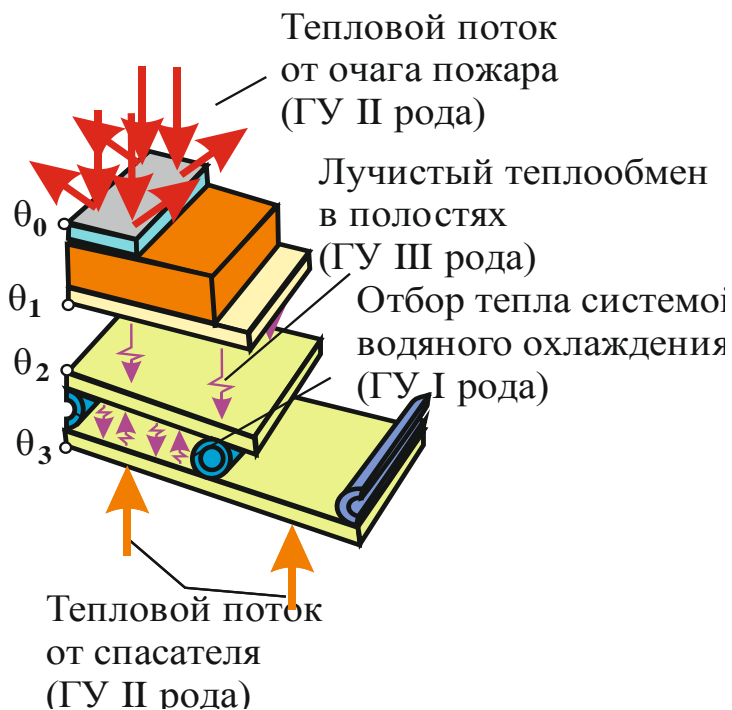


Рисунок 5 – Граничные условия для расчетной схемы противотепловой защиты

Выражение для аппроксимации уравнения теплопроводности при использовании метода конечных элементов имеет следующий вид:

$$[C_e] \{\theta_e\} + [K_e] \{\theta_e\} = \{Q_e\}, \quad (4)$$

где: $[C_e] = \rho \cdot C_p \int_V \{N\} dV$ – матрица теплоемкости конечных элементов;

$[K_e] = \int_V [B]^T [D] [B] dV$ – матрица теплопроводности конечных элементов;

$[B] = \{L\} \{N\} \theta$ – матрица распределения температур в области, ограниченной конечных элементов;

$\theta = \{N\}^T \{\theta_e\}$ – температура внутри области, ограниченной конечных элементов;

$\{T_e\}$ – вектор узловых температур конечных элементов;

$[D] = \begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix}$ – матрица теплопроводности;

$\{L\} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right\}^T$ – вектор дифференциального оператора;

$\{Q_e\} = q_w \int_S \{N\} dS$ – матрица граничных тепловых потоков конечных элементов;

$\{N\}$ – вектор формы конечных элементов, который определяет интерполяционные функции в области, ограниченной конечных элементов.

Определены значения температур на каждой итерации из выражения

$$\{\theta^{(i)}\} = \{\theta^{(i-1)}\} + \{\Delta\theta^{(i)}\} \quad . \quad (5)$$

Узловые внутренние тепловые потоки, вычисляемые при определении матрицы теплопроводности, который определяются путем численного интегрирования по времени вектора $\{\theta^{(i)}\}$ методом Эйлера с использованием выражения

$$\{\theta_{n+1}\} - \{\theta_n\} = \Delta t_n (1 - \zeta) \{\theta_n\} + \Delta t_n \zeta \{\theta_{n+1}\}, \quad (6)$$

где Δt_n – шаг интегрирования по времени; ζ – параметр Эйлера, равный 0,5, что означает реализацию неявной вычислительной схемы Кранка-Николсона.

Для решения задачи теплопроводности методом конечных элементов выбран гексаэдрический конечный элемент лагранжевого типа.

Для исследования распределения температуры в слоях противотепловой защиты получены зависимости максимальной температуры на поверхностях данных слоев.

В частности, распределения температуры в слоях при температуре на наружной поверхности теплоотражающей оболочки $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре входящей воды $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (сплошные линии) и $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (штриховые линии) представлены на рисунке 6.

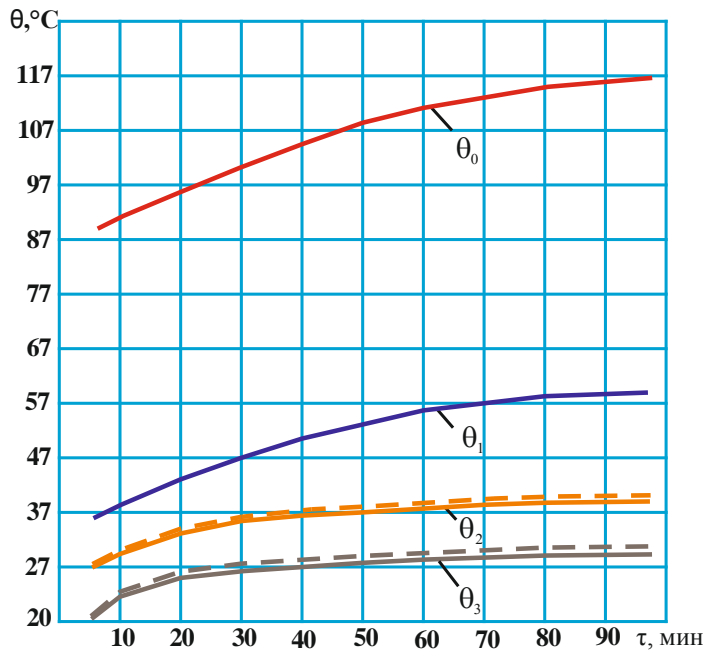


Рисунок 6 – Распределение температуры в слоях противотепловой защиты, указанных на рисунке 5, при температуре на наружной его поверхности равной $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре входящей воды: — — $20\text{ }^{\circ}\text{C}$; - - - — $25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Согласно санитарным нормам допустимая для спасателя температура в пододежном пространстве (в воздушном слое) противотепловой защиты при средней тяжести ведения работ и 100% влажности не должна превышать $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Из анализа результатов следует, что это требование выполняется (кривая θ_2) при времени 79 мин, которое является временем действия противотепловой защиты при температуре на наружной поверхности теплоотражающей оболочки $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рисунок 6).

Для исследования гидравлических процессов в системе водяного охлаждения с диапазоном температуры проточной воды $15\text{...}25\text{ }^{\circ}\text{C}$ исследован тепловой баланс подсистемы «окружающая среда – противотепловой костюм – организм спасателя»

$$Q_b = Q_n + Q_c + Q_p - \Delta Q_d - \Delta Q_{вод}, \quad (7)$$

где Q_b , Q_n , Q_c , Q_p , ΔQ_d , $\Delta Q_{вод}$ – общее количество теплоты, которое необходимо отводить из пододежного пространства проточной водой; теплота поступающая из окружающей среды через оболочку, поступающая от спасателя, выделяемая регенеративным патроном респиратора, поглощаемая различными

детальями в пододежном пространстве, отводимая из пододежного пространства водой соответственно, кДж.

Уравнение теплового баланса с учетом теплоты за счет прироста энтальпии деталей в пододежном пространстве, а также, отводимой водой, позволяет определить диаметр дросселирующей шайбы устройства для отбора требуемого количества воды, выражения для которых имеют вид

$$\Delta Q_d = m_d C_d \Delta t_d; \quad \Delta Q_{вод} = 60 \cdot m \cdot c_p \cdot \Delta t; \quad d = 3,16 \cdot \sqrt[4]{\frac{G^2}{\Delta P}}, \quad (8)$$

где m_d , m – масса деталей, нагреваемых в пододежном пространстве (респиратор), и воды соответственно, кг; C_d , c_p – средняя теплоемкость деталей и теплоемкость воды, кДж/(кг·К); Δt_d , Δt – градиент температуры деталей пододежного пространства и воды, К/ч; G – расход воды, м³/ч; ΔP – избыточное давление воды, МПа.

Определяя составляющие параметры теплового баланса при температурах окружающей среды 100, 200, 300 °С, получили требуемый расход воды не менее 0,23 м³/ч (3,88 л/мин).

В третьей главе изложена методика и результаты экспериментальных исследований энергозатрат и параметров противотепловой защиты спасателя.

Функционально энергозатраты спасателей Q_m , Вт, можно представить в виде

$$Q_m = f(m_g, V, q_m, h, \alpha), \quad (9)$$

где: m_g – масса переносимого спасателем груза, кг; V – скорость движения спасателя, м/мин; q_m – количество потребляемого спасателем кислорода из респиратора, л/мин; h – высота прохода преодолеваемого участка, м; α – угол наклона участка поверхности, °.

Для определения энергозатрат, в зависимости от вышеприведенных параметров, проведены экспериментальные исследования, на основании результатов которых получены аппроксимирующие зависимости.

Исследования проведены в тепловом комплексе НИИГД «РЕСПИРАТОР» при участии спасателей, имеющих опыт работы в изолирующем респираторе и ведения пожарно-спасательных работ, при этом проведено 13 видов упражнений.

Зависимости энергозатрат спасателей от скорости движения, безразмерной величины проема преодолеваемого участка, угла его наклона в экипировке с грузом массой 20, 30 кг, а также от угла наклона лестницы и потребления кислорода из респиратора представлены на рисунках 7-9.

При этом принято, что движение вниз осуществляется под отрицательными, а вверх – под положительными углами.

Установлено, что энергозатраты нелинейно зависят от угла наклона преодолеваемого участка, меняются, в основном, в диапазоне от 391 до 1065 Вт, что относится к категории физической загрузки как «тяжелая» и «очень тяжелая». При этом отношение энергозатрат спасателей по сравнению с ранее полученными при движении с грузом массой 30 кг вверх и вниз при $\alpha = 60^\circ$ равно 1,22 и 1,33, а по сравнению с горноспасателями (штриховая линия 4) – в среднем 1,2 в диапазоне изменения углов от 40° до 90° .

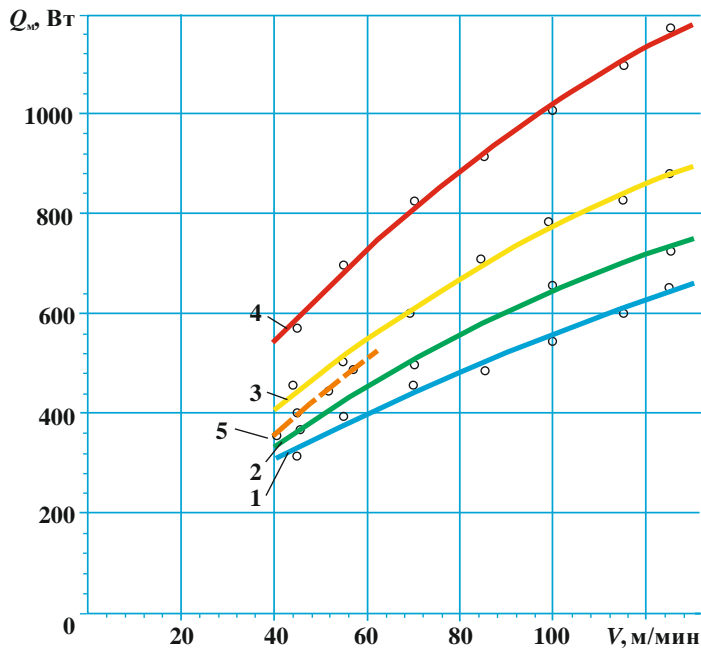


Рисунок 7 – Зависимость энергозатрат спасателей от скорости движения по горизонтальной поверхности в полный рост в экипировке: 1 – без груза; 2, 3 – с грузом 20, 30 кг; 4 – для горноспасателей без груза

Приведенные графики зависимостей позволяют определять энергетические показатели в процессе планирования различных маршрутов на учебных полигонах, при проведении аварийно-спасательных работ с высокими эрготермическими нагрузками, а также в ходе проведения исследований теплообменных процессов в противотепловой защите.

Экспериментальные исследования по определению параметров разработанной противотепловой защиты проведены согласно разработанным методикам в лабораторных и полигонных условиях НИИГД «Респиратор»: в тепловой камере при температуре 37 и 40 °С с выполнением работ на ступеньке «степ-тест» и вертикальном эргометре, а также на опытно-экспериментальном полигоне при тушении очага пожара и температуре на поверхности теплоотражающей оболочки 180...220 °С (рисунок 8).

В результате установлено, что время действия противотепловой защиты составляет около 90 мин, а максимальная погрешность результатов не более 11 процентов.



Рисунок 8 –
Расположение спасателя с
пожарным стволом возле
очага пожара

В четвертой главе, на основании результатов теоретических и экспериментальных исследований, *разработаны конструктивные и технологические решения* обоснования параметров противотепловой защиты, предложены тактические варианты его применения и произведен расчет годового экономического эффекта от внедрения результатов работы.

Противотепловая защита состоит из наружной теплоотражательной оболочки и внутреннего теплозащитного комбинезона водяного охлаждения (рисунок 9). В качестве наружной теплоотражательной оболочки рекомендован теплозащитный комплект ТК-800.



Рисунок 9 – Внутренний
теплозащитный комбинезон
водяного охлаждения с
устройством для отбора воды из
пожарного рукава

Для отбора воды из пожарного рукава применено специально разработанное устройство для отбора воды из рукавной линии, подающей воду к пожарному стволу (рисунок 10).

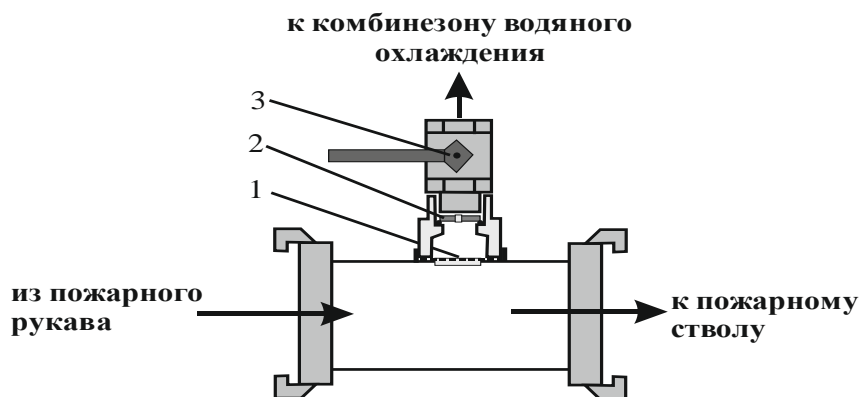


Рисунок 10 – Устройство отбора воды из пожарного рукава

На основании результатов исследований обоснованы параметры противотепловой защиты (см. таблицу). Установлено, что время ее защитного действия при одинаковой температуре воздуха окружающей среды и средней физической нагрузке на спасателя в два раза больше, чем в костюме ПТК-300 для горноспасателей аналогичного назначения. При этом масса защиты в 1,3 раза меньше ПТК-300.

Таблица - Сравнительные технические характеристики созданной противотепловой защиты (ПТЗОВ) спасателя и ПТК-300 горноспасателя аналогичного назначения с водоледяными элементами

Наименование параметра	Значение параметра	
	ПТЗОВ	ПТК-300
Время защитного действия при воздействии температуры воздуха окружающей среды $^{\circ}\text{C}$, средней нагрузке спасателя, мин, не менее		
100	90	45
200	60	30
300	40	20
Давление воды на входе в комбинезон водяного охлаждения, МПа, не более	0,3	–
Расход воды, л/ мин, не более	4	–
Масса снаряженного костюма (с респиратором), кг, не более	25	32
Средний срок службы, лет, не менее	5	5

Рассмотрены тактические возможности использования противотепловой защиты в условиях высоких эрготермических нагрузок, особенно при тушении распыленной водой и воздушно-механической пеной, а также при тушении резервуаров типа РВС, высотных зданий и сооружений, кабельных тоннелей и открытых технологических установок.

Годовой экономический эффект от внедрения противотепловой защиты за счет повышения безопасности труда спасателей при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ составляет 680 тыс. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основании установленных закономерностей теплообменных и гидравлических процессов в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – организм спасателя» *впервые* решена сложная научно-техническая задача по обоснованию параметров противотепловой защиты спасателей с охлаждением проточной водой, которая обеспечивает повышение безопасности труда спасателя при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ в условиях повышенных тепловых воздействий.

Основные выводы, научные и практические результаты выполненной работы заключаются в следующем.

1. Создание безопасных условий труда людей остается актуальным и требует своего решения на общегосударственном уровне. При этом наиболее опасными являются пожары, которые приводят к значительным материальным убыткам, большому числу потерпевших и гибели людей, в том числе личного состава пожарно-спасательных подразделений.

2. Отсутствие на оснащении аварийно-спасательных подразделений МЧС специальной противотепловой защиты снижает безопасность их труда, приводит к перегреванию организма спасателей, потере здоровья, значительным затратам на лечение и выплаты по профессиональному заболеванию.

3. *Установлены* зависимости тепловых лучистых потоков очага пожара, воздействующих на спасателя и проникающих через наружную отражающую оболочку противотепловой защиты, от максимальной температуры горящих материалов, расстояния до пожара и площади его горения. Эти зависимости необходимы для проведения исследований теплообменных процессов охлаждения пододежного пространства внутреннего комбинезона проточной водой.

4. *Разработана* расчетная схема противотепловой защиты, отличительной особенностью которой является проточная по поливинилхлоридным трубкам вода из пожарного рукава с минимально возможным количеством теплозащитных слоев, в том числе воздушным слоем, однорядным расположением трубок, что обеспечило простоту конструктивного исполнения и минимальную массу костюма.

5. *Разработана* математическая модель нестационарных теплообменных процессов в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – организм спасателя», учитывающая количество слоев и теплофизические характеристики материалов, расходно-напорную характеристику системы охлаждения, интенсивность теплообмена между водой, теплозащитными слоями и телом человека, его энергозатраты при высоких эрготермических нагрузках. По результатам исследований разработана конструкция противотепловой защиты минимальной массы с увеличением времени ее действия не менее, чем в четыре раза по сравнению с теплозащитным комплектом ТК – 800, находящимся на оснащении подразделений МЧС.

6. *Установлены* аппроксимирующие зависимости физической нагрузки (энергозатрат) спасателей от угла наклона и высоты преодолеваемого участка, массы переносимого груза и скорости движения. Показано, что эти энергозатраты относятся к категории «тяжелой» и «очень тяжелой» физической нагрузки. Полученные результаты использованы при исследованиях теплообменных процессов в противотепловой защите спасателя с водяным охлаждением проточной водой и обосновании ее технических параметров.

7. *Обоснованы* параметры противотепловой защиты спасателя, состоящей из наружной теплоотражающей оболочки, внутреннего комбинезона с водяным охлаждением, устройства отбора, подачи и регулировки воды из пожарного рукава, протекающей по поливинилхлоридным трубкам с выходом наружу в нижней части костюма. Установлено, что время ее действия, по сравнению с костюмом ПТК-300 для горноспасателей с водоледяными элементами (при одинаковых эрготермических нагрузках) в два раза выше при снижении массы в 1,3 раза.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Мамаев, В.В. Математическое моделирование нестационарных теплообменных процессов в противотепловых костюмах / В.В. Мамаев, **Г.В. Завьялов** // Научный вестник НИИГД «Респиратор», № 52. – Донецк, 2015. – С. 13-22.

2. **Завьялов, Г.В.** Оценка теплового лучистого потока, воздействующего на спасателя при тушении пожара / **Г.В. Завьялов**, Е.Л. Завьялова // Вестник Института гражданской защиты Донбасса, Вып. 4(4).– Донецк, 2015. – С. 26-32.

3. **Зав'ялов, Г.В.** Захист рятувальників від впливу тепла: монографія/ **Г.В. Зав'ялов**, Т.В. Костенко, О. А. Гаврилко та інші/ Під загальн. ред. В.К. Костенка // – Черкаський інститут пожежної безпеки.– Черкаси, 2015.–144 с.

4. **Завьялов, Г.В.** Выбор материалов для специальной теплозащитной одежды / **Г.В. Завьялов** // Научный вестник НИИГД «Респиратор», № 1(53). – Донецк, 2016. – С. 109-119.

5. Алексеенко, С.А. Энергетические показатели членов спасательных подразделений / С.А. Алексеенко, **Г.В. Завьялов**, И. Шайхлисламова // Разработка месторождений / Национальный горный университет, Вып.10, № 3. – Днепропетровск, 2016. – С. 90-96.

6. **Завьялов, Г.В.** Параметры водяного охлаждения противотеплового костюма спасателя / **Г.В. Завьялов** // Научный вестник НИИГД «Респиратор», № 4(53). – Донецк, 2016. – С. 93-101.

7. **Завьялов, Г.В.** Противотепловой костюм спасателя с системой водяного охлаждения / **Г.В. Завьялов** // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч. – техн. журн. – Донецк, 2017. – № 1(54). – С. 36-43.

8. Мамаев, В.В. Испытания противотеплового костюма спасателя с водяным охлаждением. / В.В. Мамаев, **Г.В. Завьялов** // Научный вестник НИИГД «Респиратор», № 3 (54). – Донецк, 2017. –С. 83-91.

9. Мамаев, В.В. Засоби комплексного противотеплового захисту рятувників при роботі в умовах високих температур: Матеріали науково-практичної конференції з міжнародною участю. / В.В. Мамаев, **Г.В. Завьялов** //Надзвичайні ситуації: безпека та захист / Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля, 2015. – С. 280-283.

10. **Завьялов, Г.В.** Воздействие на пожарного теплового лучистого потока пожара / **Г.В. Завьялов** // Материалы V Международная научно-практическая конференция «Промышленная безопасность и вентиляция подземных сооружений в XXI столетии».– Донецк: ДонНТУ, 2015.- С.25-32.

11. Пат. на корисну модель 109668 Україна, МПК А 62 В 17/00, А 41 D 13/00. Теплозахисний костюм / В.К. Костенко, О.Л. Зав'ялова, **Г.В. Зав'ялов**, В.М. Покалюк; заявник і власник В.К. Костенко, О.Л. Зав'ялова. – № u2016 03119; заявл. 25.03.2016; опубл. 25.08.2016, Бюл. №16.

12. **Завьялов, Г.В.** Энергетические показатели членов пожарно-спасательных подразделений/ **Г.В. Завьялов**, С.А. Алексеенко // Материалы Международной научно-технической Интернет-конференции «Инновационное развитие горнодобывающей отрасли» ДВНЗ «Криворожский национальный университет».– Кривой Рог.–2016.– С.177.

13. **Завьялов, Г.В.** Испытание противотеплового костюма с водяным охлаждением /**Г.В. Завьялов**// Первая Республиканская научная конференция «Современное состояние и перспективы дальнейшего развития системы гражданской обороны Донецкой Народной Республики», Донецк: АГЗ, 2017.- С.181-188.

14. **Завьялов, Г.В.** Испытание противотеплового костюма с водяным охлаждением /**Г.В. Завьялов**// XII Международная научно-практическая конференция, посвященная Году гражданской обороны, Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017.- С.286-290.

АННОТАЦИЯ

Завьялов Г.В. **Обоснование параметров противотепловой защиты спасателя с водяным охлаждением открытого цикла.** Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.26.01 – охрана труда. – Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики, г. Донецк, 2019 г.

Диссертация посвящена повышению безопасности труда спасателей в условиях повышенных тепловых воздействий. На основании установленных закономерностей нестационарных теплообменных и гидравлических процессов в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – организм спасателя» впервые решена научно-техническая задача по обоснованию параметров противотепловой защиты спасателя с охлаждением проточной водой.

Отсутствие на оснащении спасателей противотепловой одежды с активным охлаждением их организма существенно снижает время ее защитного действия и безопасность труда при тушении развившихся пожаров, что приводит к перегреванию их организма, потере здоровья, большим затратам на лечение и выплатам по профессиональному заболеванию.

Установлены зависимости тепловых лучистых потоков очага пожара, воздействующих на спасателя и проникающих через наружную отражающую оболочку противотепловой защиты, от максимальной температуры горящих материалов, расстояния до пожара и площади его горения. Эти зависимости необходимы для проведения исследований теплообменных процессов охлаждения пододежного пространства внутреннего комбинезона проточной водой.

Разработана математическая модель нестационарных теплообменных процессов в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – организм спасателя», учитывающая количество слоев и теплофизические характеристики материалов, расходно-напорную характеристику системы охлаждения, интенсивность теплообмена между водой, теплозащитными слоями и телом человека, его энергозатраты при высоких эрготермических нагрузках. Данное техническое решение защищено патентом на полезную модель № 109668 UA 25.08.2016.

Внедрение противотепловой защиты с охлаждением проточной водой позволит повысить безопасность труда спасателей при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ в условиях повышенных тепловых воздействий.

Ключевые слова: пожар; лучистый поток; температура; спасатель; противотепловая защита; водяное охлаждение.

Подписано в печать .2019. Формат 60x90 1/16.
Печать лазерная. Усл. печ. л. 0.98
Тираж 100 экз. Заказ № _____

Отпечатано в типографии НИИГД «Респиратор»
г. Донецк, ул. Артема, 157