

**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

УДК 614.895.5:[621.5:546.212]

**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» Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики, г. Донецк.

Научный руководитель: доктор технических наук, старший научный сотрудник
Мамаев Валерий Владимирович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,

кандидат технических наук,

Ведущая организация:

Защита состоится « ____ » _____ 2019г. в _____ 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. Развитие науки и техники, производств, технологических процессов, в которых используется большое количество огнеопасных веществ, тенденция к увеличению этажности и площадей общественных и производственных зданий требуют постоянного совершенствования способов и средств тушения спасателей.

Непосредственно на ликвидацию пожаров подразделения МЧС Украины осуществили в 2014 году свыше 68800 выездов, что составило в среднем 188 в сутки или 7,8 выездов в час.

Пожары приводят к значительным материальным убыткам, травмированию и гибели людей, в том числе личного состава пожарно-спасательных подразделений, который принимает участие в их ликвидации и проведении аварийно-спасательных работ.

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.

Так, 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 (450...650) °С и внешним тепловым потоком (35...59) кВт/м² длительность работы составляет не более 13 мин, а при выполнении тяжелой работы в этих условиях – не более 9 мин. При этом спасатель должен постоянно изменять ориентацию тела относительно фронта пламени в пределах 180°. Это может приводить к тому, что поставленная задача для спасателей останется не выполненной.

Исследования по созданию противотепловой защиты с охлаждением проточной водой из пожарного рукава при тушении пожаров приобретают особую актуальность.

Поэтому раскрытие закономерностей нестационарных теплообменных процессов в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – организм спасателя» для обоснования параметров противотепловой защиты с водяным охлаждением открытого цикла, обеспечивающего повышение безопасности труда при ведении аварийно-спасательных работ и тушении пожаров 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 – обоснование параметров противотепловой защиты спасателя с охлаждением проточной водой на основе раскрытия закономерностей нестационарных теплообменных процессов в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – организм спасателя» что позволит обеспечить повышение безопасности труда спасателя при ведении аварийно-спасательных работ в условиях повышенных тепловых воздействий.

Для достижения поставленной цели в диссертации необходимо решить следующие основные задачи:

- выполнить анализ условий работы и тактических приемов тушения пожаров на объектах с высоким уровнем теплового излучения;
- провести исследования процесса воздействия на 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;
- провести исследования энергетических показателей спасателя при различной степени тяжести выполняемой им работы в противотепловой защите;
- обосновать параметры и создать противотепловую защиту спасателя с охлаждением проточной водой, обеспечивающего повышение безопасности труда спасателя при ведении работ в условиях повышенных тепловых воздействий.

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

Предмет исследований – конструктивные и эксплуатационные параметры противотепловой защиты с водяным охлаждением тела спасателя, обеспечивающие повышение безопасности труда спасателя при ведении аварийно-спасательных работ в условиях повышенных тепловых воздействий.

Методы исследований.

Для выполнения диссертационной работы использован комплексный подход, содержащий анализ и обобщение результатов ранее полученных другими авторами, теоретические и экспериментальные методы. Теоретические методы использованы при определении тепловых лучистых потоков от очага пожара, проникающих в пододежное пространство противотепловой защиты с водяным охлаждением и распределении температуры в его слоях, разработке

математической модели нестационарных теплообменных процессов 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.

Научные положения, выносимые на защиту:

- зависимости для определения мощности тепловых лучистых потоков, действующих на спасателя от очага пожара, с учетом расстояния до него, площади и температуры очага, коэффициента облучения, лучистого потока, падающего и проникающего через наружную теплоотражающую оболочку противотепловой защиты;

- математическая модель нестационарных теплообменных процессов в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – организм спасателя», учитывающая воздействующие на наружную теплоотражающую оболочку и проникающие через нее тепловые потоки (температуры) от очага пожара, теплообмен между теплозащитными слоями с воздушной прослойкой, телом спасателя и системой охлаждения проточной водой;

- аппроксимирующие зависимости энергозатрат (тяжести выполняемых работ) спасателей при различных сочетаниях массы переносимого груза, высоты преодолеваемого участка, угла наклона и направления движений, потребления кислорода из дыхательного аппарата при подъеме и спуске по лестнице;

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

Научная новизна полученных результатов состоит в том, что впервые:

- установлены зависимости интенсивности тепловых лучистых потоков при одинаковом расстоянии до очага пожара линейного характера от площади горения, а отношения падающего на наружную поверхность теплоотражающей оболочки и проникающего через нее потоков непропорционально увеличиваются в зависимости от температуры очага пожара;

- разработана математическая модель нестационарных теплообменных и гидравлических процессов в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – организм спасателя», в которой учтены воздействующие на наружную теплоотражающую оболочку и проникающие через нее 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 действия противотепловой защиты с водяным охлаждением (при коэффициенте черноты его теплоотражающей оболочки равном 0,2, расстоянии между трубками не

превышающим 30 мм с минимальным их внутренним диаметром 3 мм, расходом воды не менее 0,24 м³/ч и давлением на входе – 0,4 МПа), оно составляет не менее 60 минут;

- установлены зависимости энергозатрат спасателей от скорости движения и угла наклона преодолеваемого участка имеющие нелинейный характер соответственно с выпуклостью вверх и вниз, их отношения от ранее полученных отличаются более, чем в 1,2 и 1,6 раза для категорий физической нагрузки, как «тяжелая» и «очень тяжелая»;

- экспериментально установлено, что при одинаковых параметрах воздуха окружающей среды, физической нагрузке спасателя время действия созданной противотепловой защиты по сравнению с используемыми подразделениями МЧС комплектом ТК-800 более, чем в четыре раза выше, и в два раза выше чем ПТК-300 для горноспасателей аналогичного назначения с уменьшением массы в 1,3 раза.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в разработке математической модели нестационарных теплообменных процессов в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – организм спасателя», на основании которой установлены зависимости для определения воздействующего на спасателя теплового лучистого потока от очага пожара и проникающего в пододежное пространство внутреннего комбинезона; определении энергозатрат спасателей при выполнении ими работ различной тяжести, что позволило обосновать параметры и создать противотепловую защиту с системой охлаждения проточной по трубкам 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 анализе состояния вопроса, 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 – тезиса докладов в материалах научных конференций, 1 – монография, 1 – патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы из 102 наименований на 11 страницах. Работа изложена на 140 страницах машинописного текста, из них 126 страницы 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, их новизна.

Первая глава посвящена анализу условий и тактических приемов тушения пожаров на объектах с высоким уровнем теплового воздействия, эрготермических нагрузок спасателей во время ведения 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 высокой температуре, влажности, задымленности атмосферы, зачастую при значительных физических нагрузках, нервном напряжении, то есть 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 водоледяных 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).

На стадии полного развития пожара зависимости для падающего теплового лучистого потока $q_{\text{п}}$ и поглощенного костюмом теплового потока $q_{\text{к}}$ имеют вид

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

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

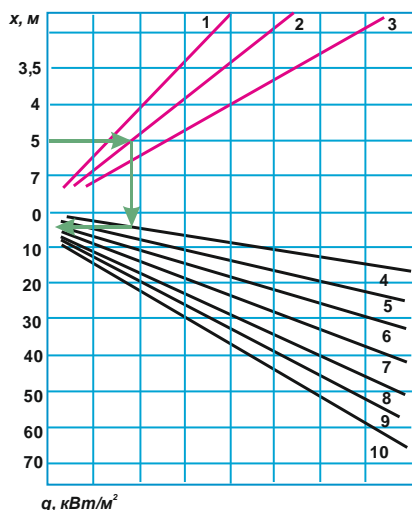


Рисунок 1 – Номограмма для определения теплового лучистого потока q в зависимости от расстояния (x) до фронта пламени пожара, его площади F и максимальной температуры горения Θ_{max} : 1, 2, 3 – 1273, 1373, 1473 К; (6...10) – $F = 6 \dots 20 \text{ м}^2$.

Выражения для удельных тепловых лучистых потоков $q_{\text{п}}$ и $q_{\text{к}}$, а также полученные результаты (рисунок 2) и их аппроксимирующие зависимости использованы в дальнейшем для исследований нестационарных процессов тепломассопереноса в поддежном 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).

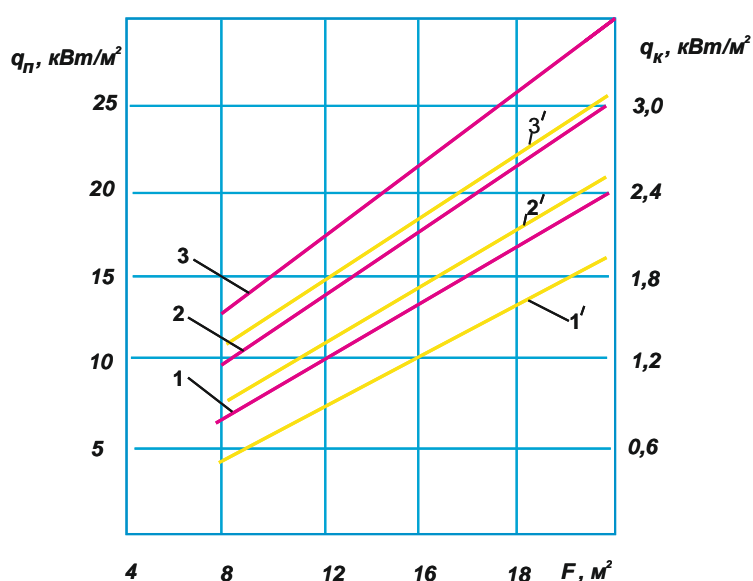


Рисунок 2 – Зависимости падающего $q_{\text{п}}$ (1, 2, 3) и поглощенного костюмом $q_{\text{к}}$ (1', 2', 3') удельных тепловых лучистых потоков от площади пожара F , максимальной температуры горения Θ_{max} на расстоянии 5 м от фронта развитого пожара при степени черноты $\varepsilon_{\text{к}} = 0,1$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

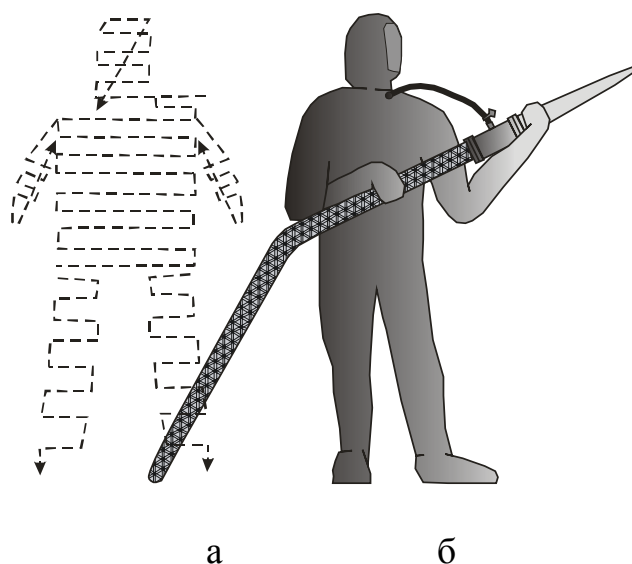


Рисунок 3 – Схема водяного охлаждения противотеплового костюма спасателя: а – направление движения воды по трубкам внутреннего комбинезона водяного охлаждения из пожарного ствола и ее движение по трубкам; б – отбор проточной воды из пожарного рукава

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.

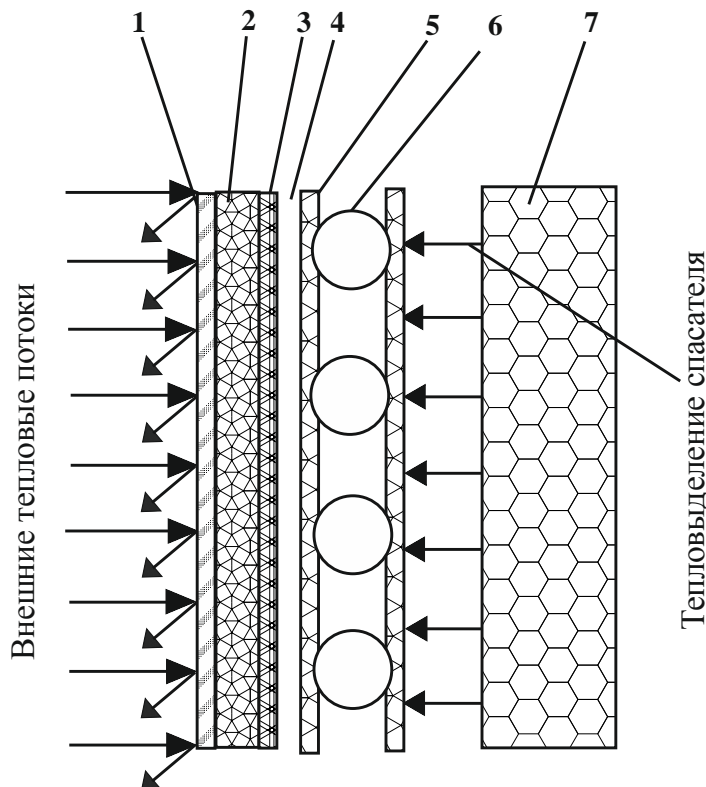


Рисунок 4 – Расчетная схема противотеплового костюма:

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

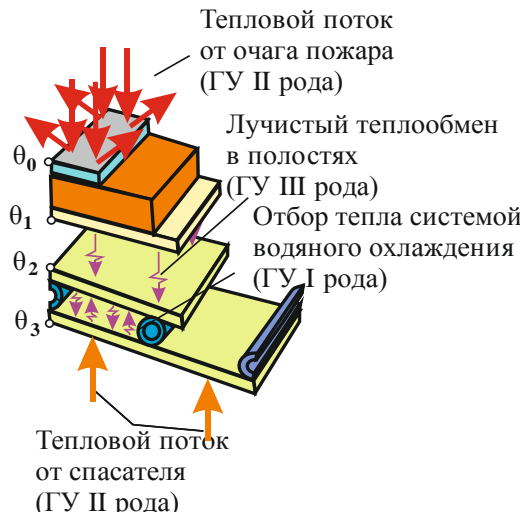


Рисунок 5 – Граничные условия на расчетной схеме противотепловой защиты

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

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

Эквивалентный вектор узловых внутренних тепловых потоков, вычисляемый при определении эквивалентной матрицы теплопроводности, который определяется путем численного интегрирования по времени вектора $\{\Delta\theta^{(i)}\}$ 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 °С и температуре входящей воды 20°С (сплошные линии) и 25 °С (штриховые линии) представлены на рисунке 6.

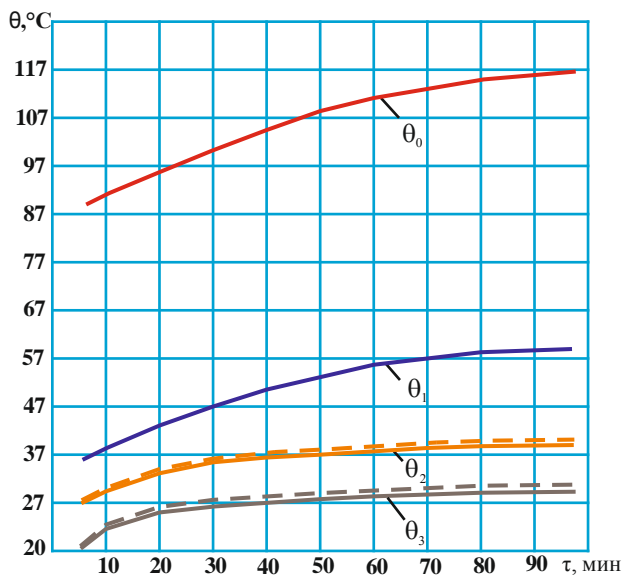


Рисунок 6 – Распределение температуры в слоях противотепловой защиты, указанных на рисунке 5, при температуре на наружной его поверхности 200°С и температуре входящей воды:

— — — — — 20°С;
 - - - - - 25°С

Согласно санитарным нормам допустимая для спасателя температура в поддежном пространстве (в воздушном слое) противотепловой защиты при средней тяжести ведения работ и 100% влажности не должна превышать 40 °С.

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 °С (рисунок 6).

Для исследования гидравлических процессов в системе водяного охлаждения с диапазоном температуры проточной воды 15...25 °С исследован тепловой баланс подсистемы «окружающая среда – противотепловой костюм – организм спасателя»

$$Q_{\text{в}} = Q_{\text{н}} + Q_{\text{с}} + Q_{\text{р}} - \Delta Q_{\text{д}} - \Delta Q_{\text{вод}}, \quad (7)$$

где $Q_{\text{в}}$, $Q_{\text{н}}$, $Q_{\text{с}}$, $Q_{\text{р}}$, $\Delta Q_{\text{д}}$, $\Delta Q_{\text{вод}}$ – 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 деталями 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

$$\Delta Q_{\text{д}} = m_{\text{д}} C_{\text{д}} \Delta t_{\text{д}}; \quad \Delta Q_{\text{вод}} = 60 \cdot m \cdot c_{\text{р}} \cdot \Delta t; \quad d = 3,16 \cdot \sqrt[4]{\frac{G^2}{\Delta P}}, \quad (8)$$

где $m_{\text{д}}$, m – масса деталей, нагреваемых в пододежном пространстве (респиратор), и воды соответственно, кг; $C_{\text{д}}$, $c_{\text{р}}$ – средняя теплоемкость деталей и теплоемкость воды, кДж/(кг·К); $\Delta t_{\text{д}}$, 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.

Функционально энергозатраты спасателей $Q_{\text{м}}$, Вт, можно представить в виде

$$Q_{\text{м}} = f(m_{\text{Г}}, V, q_{\text{м}}, h, \alpha), \quad (9)$$

где $m_{\text{Г}}$ – масса переносимого спасателем груза, кг; V – скорость движения спасателя, м/мин; $q_{\text{м}}$ – 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° .

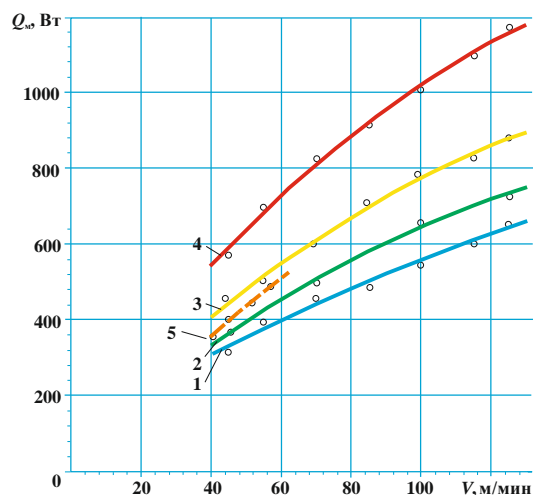


Рисунок 7 – Зависимость энергозатрат спасателей от скорости движения по горизонтальной поверхности в полный рост в экипировке:
1 – без груза;
2, 3 – с грузом 20, 30 кг;
4 – для горноспасателей без груза

Приведенные графики зависимостей позволяют определять энергетические показатели при планировании различных маршрутов на учебных полигонах, проведении аварийно-спасательных работ при высоких эрготермических нагрузках, а также при проведении 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 16 процентов.



Рисунок 8 – Перемещение спасателя с пожарным стволом вдоль фронта очага пожара

В четвертом разделе на основании результатов выполненных 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.

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

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



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

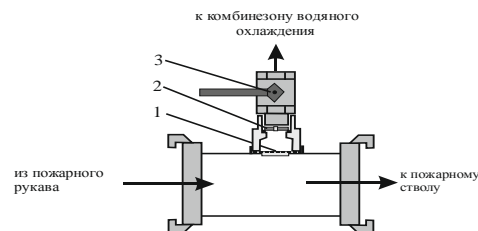


Рисунок 10 – Устройство отбора воды из пожарного рукава

На основании результатов исследований обоснованы параметры противотепловой защиты (таблица). Установлено, что ее время защитного действия при одинаковой температуре воздуха окружающей среды и средней нагрузке спасателя в два раза больше, чем в костюме ПТК-300 для горноспасателей аналогичного назначения, при снижении массы в 1,3 раза.

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, воздушно-механической пеной пожаров резервуаров типа РВС, высотных зданий и сооружений, тоннелей за счет повышения безопасности и эффективности ведения аварийно-спасательных работ.

Годовой экономический эффект от внедрения противотепловой защиты за счет повышения безопасности и эффективности спасателей при ведении аварийно-спасательных работ составляет 680 тыс. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой в области охраны труда, в которой на основании установленных закономерностей теплообменных и гидравлических процессов в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – организм спасателя» впервые решена актуальная научно-техническая задача по обоснованию параметров противотепловой защиты спасателей с охлаждением проточной водой, обеспечивающей повышение безопасности труда спасателя при ведении 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 МЧС при ликвидации пожаров и ведении аварийно-спасательных работ.

2. Отсутствие на оснащении аварийно-спасательных подразделений МЧС специальной противотепловой защиты снижает их безопасность 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 веществ, расстояния до пожара и площади его горения для 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, результаты которых 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 аналогичного назначения 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. 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 рятувальників 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 // 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. 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.