DOI: *10.25515/PMI.2018.3.326*

Геоэкология и безопасность жизнедеятельности

УДК 622.867.3:614.895.51:621.56

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОТИВОТЕПЛОВОМ КОСТЮМЕ СПАСАТЕЛЯ С АКТИВНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

В.Р.АЛАБЬЕВ[1], Г.В.ЗАВЬЯЛОВ[2]
[1] *Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия*
[2] *Донецкая академия гражданской защиты, Донецк*

Пожары сопровождаются возникновением ряда опасных для здоровья факторов, одним из которых является лучистый тепловой поток в сочетании с высокой температурой окружающей среды. Для защиты пожарных используется специальная одежда от повышенного теплового воздействия и одежда изолирующего типа. Показано, что принцип действия такой одежды основан на пассивной тепловой защите за счет применения материалов с низкой теплопроводностью или высокой теплоемкостью. Время защитного действия костюмов невелико, что значительно сокращает длительность работы в неблагоприятных климатических условиях, увеличивает трудоемкость работ, ведет к перегреванию организма.

Отмечено, что одним из направлений совершенствования противотепловой одежды является создание костюмов с активным охлаждением. Показано, что разработанные противотепловые костюмы на основе водоледяных охлаждающих элементов не нашли широкого применения в связи с большими затратами. Целесообразна разработка противотеплового костюма активного охлаждения с использованием наиболее доступного хладоносителя – проточной воды, циркулирующей по поливинилхлоридным трубкам, расположенным между слоями костюма.

Поставленная в работе цель – раскрытие закономерностей нестационарных теплообменных процессов в системе «тепловой поток очага пожара – противотепловой костюм – тело спасателя» с охлаждением организма спасателя проточной водой, циркулирующей в пододежном пространстве по поливинилхлоридным трубкам, и разработка метода для определения времени защитного действия противотеплового костюма достигнута путем решения уравнения нестационарной теплопроводности методом конечных элементов. Математическая модель отличается учетом внешнего лучистого потока от пожара, внутреннего теплового потока тела спасателя, теплоизоляционных свойств различных материалов костюма, их геометрических параметров, температуры хладоносителя.

Установлено, что время защитного действия противотеплового костюма с водяным охлаждением значительно выше, чем костюмов аналогичного назначения для пожарных и спасателей МЧС.

***Ключевые слова*:** пожар, нестационарный теплообмен, тепловой поток, температура, противотепловой костюм, спасатель, защитное действие, теплофизические параметры, проточная вода

***Как цитировать эту статью*:** Алабьев В.Р. Математическая модель теплообменных процессов в противотепловом костюме спасателя с активным охлаждением / В.Р.Алабьев, Г.В.Завьялов // Записки Горного института. 2018. Т. 231. С. 326-332. DOI: 10.25515/PMI.2018.3.326

Введение. Обеспечение пожарной безопасности предприятий и организаций является весьма сложной задачей, направленной на предотвращение пожаров при осуществлении человеком своей деятельности и ликвидацию пожаров в случае их возникновения с минимальными экономическими, экологическими и социальными последствиями. Пожары сопровождаются возникновением ряда опасных факторов, представляющих серьезную угрозу здоровью и жизни людей, застигнутых огненной стихией, и спасателей, участвующих в ликвидации этого вида катастроф. Одним из таких факторов является лучистый тепловой поток в сочетании с высокой температурой окружающей газопаровоздушной среды, который порой не позволяет приблизиться к очагу возгорания и делает невозможным эффективную борьбу с пожаром. Для защиты от этого неблагоприятного воздействия используется специальная защитная одежда пожарного от повышенных тепловых воздействий и специальная защитная одежда изолирующего типа. Принцип действия такой защитной одежды основан на пассивной тепловой защите, т.е. защите, осуществляемой за счет применения материалов с низкой теплопроводностью или высокими теплоемкостью и плотностью без обеспечения теплосъема хладоносителем с принудительной циркуляцией [4].

Отсутствие противотеплового костюма с активным охлаждением снижает безопасность ведения аварийно-спасательных работ, существенно сокращает время пребывания в зоне тушения пожаров, особенно в летний период. Это зачастую приводит к перегреванию организма и, как следствие, потере здоровья и большим затратам на лечение и выплаты по профессиональным заболеваниям. Для профилактики заболеваний сокращают длительность работы в неблагоприятных климатических условиях [5]. Так, допустимая длительность работы средней тяжести (раз-

DOI: *10.25515/PMI.2018.3.326*

ведка пожара, работа со стволом и тому подобное) в теплозащитном костюме (ТК) при тепловых потоках 10,5; 7,0 и 4,2 кВт/м^2 должна составлять соответственно не более 10; 15 и 20 мин. При тяжелой работе (передвижение со стволом, переноска груза, разборка конструкций и т.п.) при этих же условиях не более 8; 12 и 16 мин. В теплоотражательном костюме (ТОК) в зоне с температурой окружающего воздуха до 450-650 °С и тепловым потоком 35-59 кВт/м^2 – не более 13 мин, длительность тяжелой работы в этих условиях – не более 9 мин [4]. Такие малые сроки нахождения в зоне ведения противопожарных работ увеличивают трудоемкость работ, снижают их эффективность. Данное обстоятельство требует постоянного совершенствования средств индивидуальной противотепловой защиты пожарных, спасателей МЧС и горноспасателей ВГСЧ.

В настоящее время для ведения аварийно-спасательных работ в условиях нагревающего микроклимата горноспасатели применяют типоряд противотепловой одежды (куртки, костюмы) с активным охлаждением с помощью локально расположенных в пододежном пространстве водоледяных охлаждающих элементов, теплосъем в которых происходит за счет конвекции и излучения [6, 7, 10]. Для замораживания элементов, хранения и доставки к месту ведения работ необходимо применять морозильные установки, в том числе передвижные азотные, переносные и передвижные теплоизолирующие контейнеры [1], что в организационном плане усложняет ведение спасательных работ и значительно повышает стоимость их проведения.

В зарубежной практике в конце XX в. также использовалась противотепловая одежда с водоледяным охлаждением. Наибольшую известность приобрел противотепловой жилет производства компании Dräger (Германия), который используется в некоторых странах СНГ [13, 14]. Охлаждающее действие жилета обеспечивается охлаждающими элементами, которые встроены в противотепловой жилет. Базовым материалом охлаждающих элементов является глауберова соль, которая при температуре ниже 22 °С является твердым телом. При температуре поверхности 28 °С содержимое охлаждающих элементов переходит в жидкое состояние, поглощая при этом тепловую энергию, выделяемую телом рабочего. В зависимости от интенсивности физической работы и окружающей температуры жилет обеспечивает охлаждение тела не менее 3 ч. После использования охлаждающие элементы жилета необходимо вынуть. Если температура окружающей среды ниже 22 °С, то в течение 2 ч содержимое охлаждающих элементов возвращается в прежнее (твердое) состояние и жилет можно использовать повторно.

Достоинства противотеплового жилета Dräger: замораживание охлаждающих элементов не требуется; готовность к немедленному использованию; длительное время защитного действия, малая масса, огнестойкость. К недостаткам охлаждающего жилета с соляной смесью следует отнести необходимость плотного прилегания к телу человека, так как охлаждение происходит за счет процесса теплопроводности, что при длительном применении может привести к так называемому «парниковому эффекту», а следовательно, к различным заболеваниям. В случае применения жилета в условиях высоких значений температуры будет невозможно восстановить его функциональное состояние.

Разработанные противотепловые костюмы для охлаждения пожарных и горноспасателей за счет поглощения тепла, вырабатываемого телом человека, при фазовом переходе хладагента охлаждающих элементов в процессе тушении пожаров с высоким лучистым тепловым потоком [2] не нашли широкого практического применения в связи с большими материальными затратами. В этих условиях целесообразна разработка противотеплового костюма с кондуктивным теплосъемом с помощью циркулирующего по поливинилхлоридным трубкам хладоносителя, который широко используется пожарными для тушения пожаров, – проточной водой.

В работе [8] приведены результаты математического моделирования нестационарных теплообменных процессов в противотепловых костюмах с водяным охлаждением, решение которого получено путем использования метода конечных разностей. При этом принято допущение об установке поливинилхлоридных трубок в поперечном сечении по всей ширине воздушной прослойки, что не соответствует конструктивному исполнению костюмов, так как трубки располагаются в двух направлениях, а воздушная прослойка находится между наружным и внутренним слоями костюма, а не между трубками. Кроме того, не учтены различные значения степени черноты слоев. Это привело к тому, что полученные результаты по определению времени защитного действия противотепловых костюмов завышены по сравнению с результатами экспериментальных исследований на 44 % [5].

Постановка проблемы. Целью данной работы является раскрытие закономерностей нестационарных теплообменных процессов в системе «тепловой поток очага пожара – противотепло-

DOI: 10.25515/PMI.2018.3.326

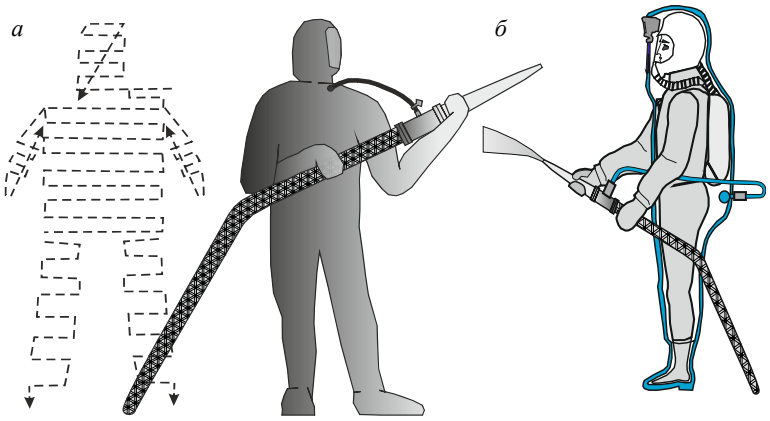


Рис.1. Схема водяного охлаждения противотеплового костюма спасателя: *а* – отбор воды из пожарного ствола и ее движение по поливинилхлоридным трубкам; *б* – устройство для подачи воды в костюм

вой костюм – тело спасателя» с охлаждением организма спасателя проточной водой, циркулирующей в пододежном пространстве по поливинилхлоридным трубкам, и разработка метода для определения времени защитного действия противотеплового костюма. Это позволит обосновать параметры противотепловой одежды с активным теплосъемом, обеспечивающие повышение эффективности и безопасности спасателей при тушении пожаров.

Методология. Теоретические исследования нестационарных теплообменных процессов в противотепловом костюме с охлаждением по поливинилхлоридным трубкам проточной водой проведены с использованием одного из основных методов решения уравнения теплопроводности – метода конечных элементов, в результате чего стало возможным определение времени защитного действия противотеплового костюма с активным охлаждением.

Обсуждение. Для разработки математической модели нестационарных теплообменных процессов в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – хладоноситель – тело спасателя» принята схема работы спасателя в костюме при поступлении в гидравлическое устройство воды из пожарного рукава (рис.1).

Противотепловой костюм состоит из наружного слоя с металлизированным отражающим покрытием, теплозащитного слоя, внутреннего слоя – комбинезона с водяным охлаждением и воздушной прослойкой между слоями. Охлаждающим элементом в противотепловом костюме являются полихлорвиниловые трубки, наполненные водой, которые объединены между собой и соединены с пожарным стволом. После прохождения по трубкам отработанная вода выходит из периферийных участков костюма в области нижних конечностей. Расчетная схема противотеплового костюма представлена на рис.2.

Нестационарное уравнение теплопроводности имеет вид

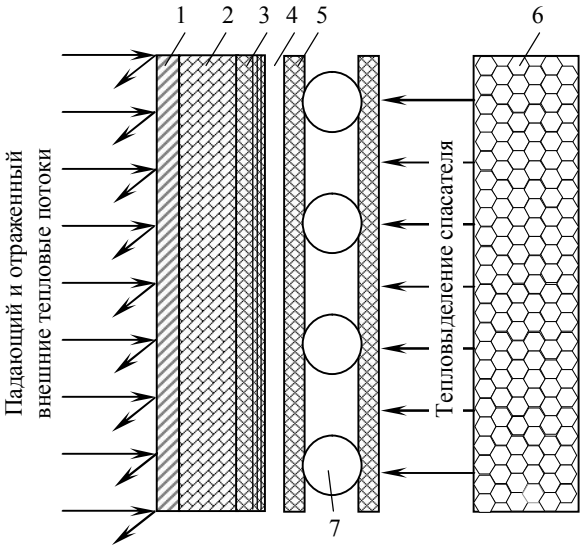


Рис.2. Расчетная схема противотеплового костюма

1 – наружный слой с металлизированным отражающим покрытием; 2 – теплозащитный слой; 3 – внутренний слой; 4 – воздушная прослойка; 5 – слой водяного охлаждения; 6 – тело спасателя; 7 – трубки с водой

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\lambda}{C_p \rho}\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}\right), \qquad (1)$$

где θ – температура, °С; t – время, с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт /(м·°С); C_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С); ρ – плотность, кг/м^3.

Для решения уравнения (1) использован метод конечных элементов [9]. Граничные условия I и II рода имеют вид соответственно

$$\theta|_{x,z} = \theta_w \quad \text{и} \quad q|_{x,z} = q_w,$$

где θ_w и q_w – соответственно температура, °С, и тепловой поток, Вт/м^2 на границе расчетной области.

Лучистый теплообмен между слоями противотеплового костюма и трубками учитываем путем решения интегрального уравнения лучистого теплообмена между поверхностями. Граничное условие III рода

$$\sum_{j=1}^{N}(\delta_{ij} - \varphi_{ij})\sigma T_j^4 = \sum_{j=1}^{N}\frac{1}{A_j}\left(\frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_j} - \varphi_{ij}\frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_j}\right)q_j,$$

DOI: 10.25515/PMI.2018.3.326

где δ_{ij} – параметр, который равен нулю, если $i \neq j$, и равен единице, если $i = j$; φ_{ij} – лучевые форм-факторы, зависящие от взаимного расположения i-й и j-й площадей поверхностей, которые обмениваются излучением, и определяются по интегральному уравнению лучистого теплообмена между поверхностями, излучающими тепло; σ – постоянная Стефана – Больцмана, равная $5{,}67 \cdot 10^{-11}$ кВт/(м^2·К^4); T – температура, К; ε_i, ε_j – степень черноты поверхностей; q_j – поверхностный тепловой поток через i-ю поверхность, которая обменивается излучением с j-й поверхностью.

Граничные условия теплообмена между слоями костюма и точками, в которых определяем температуру в слоях, приведены на рис.3, а состав и теплофизические характеристики материалов костюма – в таблице.

Для решения уравнения (1) применим метод эффективного теплового потока излучения. При этом используем обобщенный закон Стефана – Больцмана [9]

$$\sum_{j=1}^{N}[\delta_{ij} - (1-\varepsilon_i)\varphi_{ij}]q_j^0 = \varepsilon_i \sigma \theta_i^4,$$

где q_j^0 – тепловой поток от излучения поверхности j-го конечного элемента (КЭ).

Выражение для аппроксимации уравнения теплопроводности при использовании КЭ имеет следующий вид:

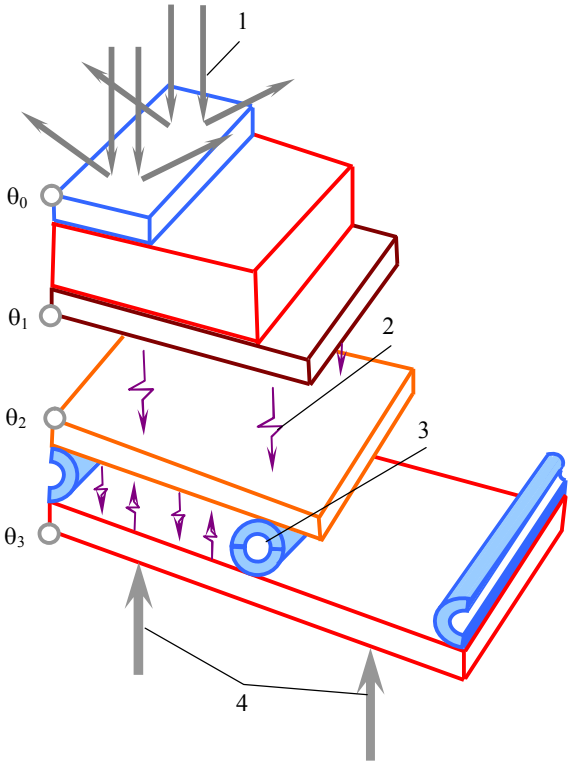


Рис.3. Схема граничных условий (ГУ) на поверхностях расчетной области слоев костюма и контрольных точек для определения температуры в слоях

1 – тепловой поток от очага пожара (ГУ II рода); 2 – лучистый теплообмен в слоях (ГУ III рода); 3 – отбор тепла водяным охлаждением (ГУ I рода); 4 – тепловой поток от спасателя (ГУ II рода); θ_0- θ_3 – температура в слоях

$$[C_e]\{\theta_e\} + [K_e]\{\theta_e\} = \{Q_e\},$$

где $[C_e] = \rho C_p \int_V \{N\} dV$ – матрица теплоемкости КЭ; $[K_e] = \int_V [B]^T [D] [B]\, dV$ – матрица теплопроводности КЭ; $\{Q_e\} = q_W \int_S \{N\} dS$ – матрица граничных тепловых потоков КЭ; $[B] = \{L\}\{N\}\theta$ – матрица распределения температур в области, ограниченной КЭ; $\theta = \{N\}^T\{\theta_e\}$ – температура внутри области, ограниченной КЭ; $[D] = \begin{pmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda \end{pmatrix}$ – матрица теплопроводности; $\{L\} = \left\{\frac{\partial}{\partial x}\ \frac{\partial}{\partial y}\ \frac{\partial}{\partial z}\right\}^T$ – вектор дифференциального оператора; $\{N\}$ – вектор формы конечных элементов, который определяет интерполяционные функции в области, ограниченной КЭ.

Теплофизические характеристики материалов костюма

Слой костюма	Материал	Коэффициент теплопроводности λ, Вт·м$^{-1}$·°С$^{-1}$	Удельная теплоемкость C_p, кДж·кг$^{-1}$·°С$^{-1}$	Плотность ρ, кг/м^3
Наружный слой с металлизированным отражающим покрытием	Керамоволоконная ткань LYTX – 208A2	0,164	0,6	500
Теплозащитный слой	БСТВ (базальтовое супертонкое волокно)	0,034	0,8	14
Внутренний слой	Номекс	0,047	1,3	316,8
Воздушная прослойка	Воздух	1,005	0,2375	1,225
Термобелье двойное	Номекс	0,047	1,3	316,8
Охлаждающие трубки	Полихлорвинил	0,15	1,2	1300

DOI: *10.25515/PMI.2018.3.326*

Для нестационарной задачи теплопроводности можно записать разрешающую систему нелинейных уравнений в матричном виде:

$$[K]\{\theta\} = \{Q_e\}, \quad (2)$$

где [K] – эквивалентная матрица теплопроводности, зависящая от объемной теплоемкости и коэффициента теплопроводности материала.

В обобщенном виде выражение (2) можно записать так:

$$\{P(\theta)\} = \{Q_e\}, \quad (3)$$

где {P(θ)} – вектор внутренних узловых тепловых потоков, определяемый плотностями тепловых потоков элемента.

Данную систему уравнений решаем итерационным методом, известным как метод Ньютона – Рафсона [12]. При использовании этого метода невязка минимизируется:

$$\{\Phi\} \equiv \{Q_e\} - \{P(\theta)\} \to \{0\}.$$

Метод Ньютона – Рафсона основан на применении усеченных рядов Тейлора для остаточного вектора невязки. Этим система уравнений (3) линеаризуется и записывается в виде

$$\left[K_T^{(i-1)}\right]\left\{\Delta\theta_e^{(i)}\right\} = \left\{Q^{(i)}\right\} - \left\{P^{(i)}\right\}. \quad (4)$$

При этом выполняются равновесные итерации (i = 1, 2, 3 ...), в результате чего определяем новые значения температур на каждой итерации из выражения

$$\left\{\theta^{(i)}\right\} = \left\{\theta^{(i-1)}\right\} + \left\{\Delta\theta^{(i)}\right\}.$$

Процесс выполнения итераций продолжаем до тех пор, пока не достигнем приемлемой сходимости.

В уравнении (4) коэффициенты касательной матрицы $[K_T]$ определяются из выражения

$$\left[K_T^{(i-1)}\right] \equiv \left(\frac{d\{\Phi\}}{d\{\theta\}}\right)_{i-1}.$$

Разложение вектора {Φ} в усеченный ряд Тейлора имеет вид

$$\left\{\Phi^{(i)}\right\} \cong \left\{\Phi^{(i-1)}\right\} + \left[K_T^{(i-1)}\right]\left\{\Delta\theta^{(i)}\right\},$$

где $\left\{\Delta\theta^{(i)}\right\} = \left\{\theta^{(i)}\right\} - \left\{\theta^{(i-1)}\right\}$ – искомый вектор приращения температуры для проведения следующей итерации.

В уравнении (4) $\{Q^{(i)}\}$ – вектор узловых тепловых потоков, рассчитываемый при переопределении вектора внешнего заданного теплового потока $\{Q_{0n}\}$ и эквивалентной матрицы теплопроводности [K]; $\{\overline{P}\}$ – эквивалентный вектор узловых внутренних тепловых потоков, вычисляемый при переопределении эквивалентной матрицы теплопроводности, определяемой путем численного интегрирования по времени вектора $\left\{\Delta\theta^{(i)}\right\}$ методом Эйлера [12] с использованием выражения

$$\left\{\theta_{n+1}\right\} - \left\{\theta_n\right\} = \Delta t_n (1-\varsigma)\left\{\theta_n\right\} + \Delta t_n \varsigma \left\{\theta_{n+1}\right\}, \quad (5)$$

где Δt_n – шаг интегрирования по времени; ζ – параметр Эйлера, равный 0,5, что означает реализацию неявной вычислительной схемы Кранка – Николсона [9, 12].

Учитывая всю совокупность поверхностей КЭ, которые обмениваются излучением, записываем систему нелинейных уравнений в матричной форме:

$$[G]\{q^0\} = \{S\}. \quad (6)$$

Элементы матрицы [G] определяем по формуле

$$G_{ij} = \delta_{ij} - (1-\varepsilon_i)\varphi_{ij}, \quad (7)$$

DOI: *10.25515/PMI.2018.3.326*

а элементы матрицы {S} – по выражению

$$S_{ij} = \varepsilon_i \sigma \theta^4 . \qquad (8)$$

Систему уравнений (15) решаем для каждой излучающей поверхности методом итераций по схеме, которая выражается формулой

$$q_i^n = \psi q_i^{k+1} + (1 - \psi)\, q_i^k, \qquad (9)$$

где ψ – релаксационный коэффициент лучистого теплового потока; k – номер итерации.

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

Используя зависимость (5) с учетом уравнений (6)-(9) и вышеприведенных матриц, получим распределения температур в слоях костюма во времени для различных воздействующих лучистых тепловых потоках (температур) окружающей среды и температур охлаждающей воды при средней тяжести работ, выполняемых спасателем. В частности, эти распределения при температуре наружной поверхности костюма 200 °С, температуре охлаждающей воды 20 и 25 °С с расходом 0,23 м^3/ч и рациональном расстоянии между полихлорвиниловыми трубками 20 мм представлены на рис.4.

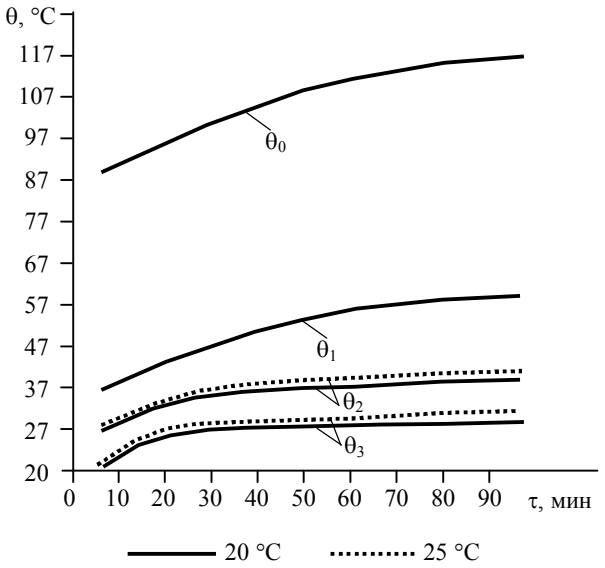


Рис.4. Распределение температуры в слоях костюма при различной температуре входящей воды θ_3
θ_0 – наружный слой с металлизированным отражающим покрытием; θ_1 – теплозащитный слой; θ_2 – воздушный слой

Согласно медицинским показаниям, допустимая температура в пододежном пространстве (в воздушном слое) противотеплового костюма при средней тяжести ведения работ и 100 %-ной относительной влажности воздуха не должна превышать 40 °С [3, 11, 15]. Из рис.4 следует, что это требование выполняется в течение 76 мин (кривая θ_2). Этот период и является временем защитного действия костюма. Погрешность по сравнению с данными экспериментальных исследований при этом составляет не более 16 % (90 мин).

Результаты исследований показывают, что при воздействии на противотепловой костюм с активным охлаждением проточной водой воздухом с температурой 100 и 300 °С время его защитного действия составляет соответственно 114 и 51 мин. Параметры разработанного костюма по сравнению с костюмами аналогичного назначения для пожарных (ТК и ТОК), а также противотеплового костюма для горноспасателей ПТК-300 показывают, что при температуре окружающей среды 200 °С время защитного действия костюма увеличивается соответственно в пять и в два раза.

Выводы

1. Разработана математическая модель нестационарных теплообменных процессов в системе «окружающая среда – противотепловой костюм – тело спасателя», отличающаяся учетом внешнего лучистого потока от пожара и внутреннего – метаболического тепла организма спасателя, отводимого проточной водой, циркулирующей по полихлорвиниловым трубкам противотеплового костюма с высокими теплоизоляционными свойствами.

2. Основная техническая характеристика разработанного костюма – время защитного действия при средней нагрузке спасателя при одинаковых условиях применения – значительно выше по сравнению с костюмами аналогичного назначения, используемыми пожарными (спасателями) МЧС и горноспасателями ВГСЧ. Его внедрение позволит существенно повысить производительность и безопасность ведения аварийно-спасательных работ в условиях высоких значений температуры воздуха окружающей среды.

DOI: *10.25515/PMI.2018.3.326*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Воронов П.С.* Установка для замораживания охлаждающих элементов к противотепловым средствам горноспасателей / П.С.Воронов, И.Ф.Марийчук // Уголь Украины. 2003. № 11 (563). С. 12-14.

2. *Гаврилко О.А.* Математичне моделювання нестаціонарного переносу тепла в захисному одязі пожежних і гірничорятувальників з водольодяною системою охолодження // Пожежна безпека: Зб. наук. праць, ЛІПБ: УкрНДІПБ МНС України. Львів. 2002. С. 76-82.

3. ГОСТ ISO 11612-2014. Система стандартов безопасности труда. Одежда для защиты от тепла и пламени. Общие требования и эксплуатационные характеристики. Введ. 2015-12-01. М.: Стандартинформ, 2015. 23 с.

4. ГОСТ Р 53264-2009. Техника пожарная. Специальная защитная одежда пожарного. Общие технические требования. Методы испытаний. Введ. 2009-04-30. М.: Изд-во стандартов, 2009. 37 с.

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

6. *Карпекин В.В.* Определение параметров водоледяного аккумулятора холода для противотепловой одежды горноспасателей / В.В.Карпекин, И.Ф.Марийчук, Ю.В.Клименко // Науковий вісник НГА України. Дніпропетровськ. 2002. № 5. С. 82-86.

7. *Клименко Ю.В.* Теоретические основы тепловых расчетов противотепловой одежды для горноспасателей // Науковий вісник НГА України. Дніпропетровськ. 2001. № 3. С. 70-73.

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

9. Метод конечных элементов в механике твердых тел / А.С.Сахаров, В.М.Кислоокий, В.В.Киричевский, И.Альтенбах, У.Габберт, Ю.Данкерт, Х.Кепплер, З.Кочык. Киев: Вища школа, 1982. 480 с.

10. Многократное применение охлаждающих элементов противотепловой одежды / В.О.Положий, И.Ф.Марийчук, О.В.Попазова, А.А.Гаврилко // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. НИИГД «Респиратор». Донецк, 2012. Вып. 1 (49). С. 165-172.

11. *Поповский Д.В.* Боевая одежда и снаряжение пожарного: Методическое пособие / Д.В.Поповский, В.Ю.Охломенко, под общ. ред. В.А.Грачева. М.: Академия ГПС МЧС России, 2004. 86 с.

12. *Тихонов А.Н.* Уравнения математической физики / А.Н.Тихонов, А.А.Самарский. М.: Высшая школа, 1977. 664 с.

13. Пожару – нет. Personal protection // URL: https://pojaru.net.ru/_ld/15/1561_W6N.pdf (дата обращения 14.10.2017).

14. Dräger. Продукция и услуги. Охлаждающий жилет Dräger CVP 5220 // URL: https: //www.draeger.com / ru_ru / Applications/Products/Personal-Protection-Equipment/Protective-Clothing/Cooling-Vests/Comfort-Vest (дата обращения 14.10.2017).

15. Textiles for protection. Ed. by Richard A.Scott. Woodhead Publishing Limited and CRC Press, 2005. 754 p. ISBN 1855739216.

***Авторы*: В.Р.Алабьев**, *д-р техн. наук*, *профессор*, *avr.09@mail.ru* (*Кубанский государственный технологический университет*, *Краснодар*, *Россия*), **Г.В.Завьялов**, *старший преподаватель*, *zavyalov57@mail.ua* (*Донецкая академия гражданской защиты*, *Донецк*).

Статья поступила в редакцию 23.10.2017.
Статья принята к публикации 02.04.2018.