

УДК 614.89:006.015

**ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА
СПЕЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ ПОЖАРНЫХ****Дмитракович Н.М.**

Предложена физико-математическая модель, которая позволяет проводить моделирование тепло- и влагопереноса в системе «человек – защитная одежда – внешняя среда» с учетом внутреннего состояния тела человека при учете дополнительного компартмента-защитной одежды. Приведены модели, учитывающие устойчивость к воздействию теплового потока специальной защитной одежды от количества циклов теплового нагружения.

Ключевые слова: одежда специальная защитная, компартмент, терморегуляция, тепловой комфорт.

(Поступила в редакцию 13 августа 2018 г.)

Введение. Обеспечение безопасных условий труда человека является одним из приоритетных направлений социально-экономического развития государства и общества, что, в свою очередь, является неотъемлемым условием для эффективного выполнения работником своих функциональных обязанностей. Право на здоровые и безопасные условия труда работников гарантирует статья 41 Конституции Республики Беларусь [1].

Первая защитная одежда пожарных Военизированной противопожарной службы МВД СССР появилась в начале 1980-х гг. и представляла собой текстильные материалы из волокон природного происхождения. Такая одежда не могла отвечать параметрам безопасности пожарного в условиях открытого пламени, повышенных температур, что приводило к получению травм, гибели пожарных.

В Российской Федерации с 1990-х годов начаты работы по созданию принципиально новых синтетических огнестойких материалов и СИЗ пожарных-спасателей, которыми занимается Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны» МЧС России [2].

Сегодня, несмотря на значительное снижение пожаров и гибели людей от них, принятие исчерпывающих мер по обеспечению целей устойчивого развития Республики Беларусь и, как следствие, снижение рисков чрезвычайных ситуаций, значительно повысилась сложность происходящих техногенных аварий, катастроф, которые требуют постоянного повышения уровня боеготовности органов и подразделений по чрезвычайным ситуациям, безопасности труда пожарных-спасателей, совершенствование средств индивидуальной защиты пожарных.

Теоретические основы проектирования специальной защитной одежды с учетом внутренней терморегуляции пожарного при выполнении аварийно-спасательных работ. Исследования, проведенные на базе Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси совместно с Университетом гражданской защиты МЧС Беларуси под общим руководством А.Д. Чорного, позволили исследовать функциональность защитной одежды с точки зрения ее теплоизоляционных свойств и изучить реакции человеческого организма с учетом анатомических, физиологических и теплофизических особенностей на изменение внешних условий при ее использовании [3].

Тело человека представлено как N элементарных компонентов в виде простых геометрических фигур (сфера, цилиндр, пластина), называемых компартментами, тогда как тепловые процессы описываются через последовательность математических зависимостей, основанных на физических законах сохранения и специальных алгоритмах терморегуляции, устанавливающих связь как между компартментами, так и с окружающей средой (рис. 1). Каждый из компартментов представляется набором K слоев с J ячейками (долями), соответствующих, например, коже, мышечной, костной и другим тканям [4, 5]. Система кровообращения выступает в качестве дополнительного компартмента особого типа. Одежда с прослойками воздуха между ее внутренней поверхностью и кожей может рассматриваться либо как дополнительный компартмент со слоями, либо учитываться через эффективные коэффициенты теплоотдачи и влагопереноса от кожи в окружающую среду.

Таким образом, компартментный подход позволяет перейти на основе математических моделей к количественной оценке процессов переноса как для отдельных частей, так и

в целом тела человека на их основе. Для такого анализа, следует определить пути теплопродукции и теплоотдачи с формулировкой уравнений, включающих члены, которые могут быть измерены или оценены [4].

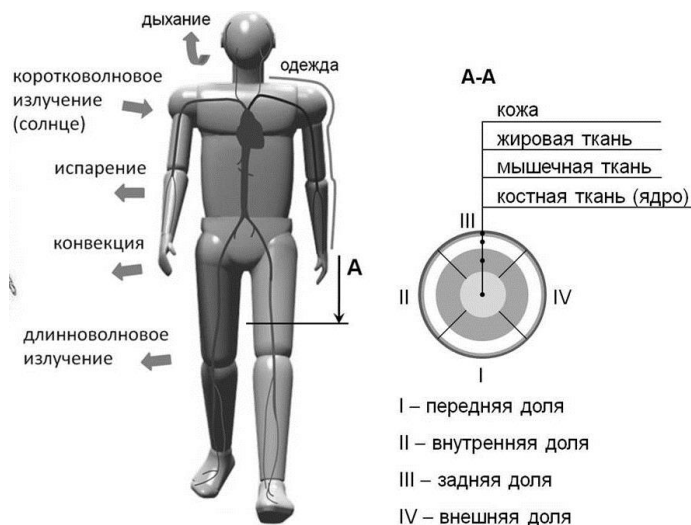


Рисунок 1. – Виртуальная модель тела человека в одежде

Как было указано выше, при рассмотрении компартментной модели тела человека основой для определения теплопереноса к поверхности кожи является биотепловое уравнение [9], справедливое для каждой ткани (мышечной, костной, жировой, кожной):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \underbrace{\frac{1}{r^\omega} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^\omega k \frac{\partial T}{\partial r} \right)}_{\text{теплопроводность}} + \underbrace{\rho_b C_{pb} \omega_b (T_a - T)}_{\text{перенос теплоты кровью}} + \underbrace{q_m}_{\text{производство тепла за счет метаболизма}}, \quad (1)$$

где ω – скорость перфузии для плоских и цилиндрических компартментов, $\text{кг/м}^3 \cdot \text{с}$; ρ – плотность компартмента, кг/м^3 ; C_p – теплоемкость компартмента, $\text{Дж/кг} \cdot \text{К}$; k – теплопроводность ткани, $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$; q_m – базальтовая метаболическая теплопродукция в ткани, Дж ; ρ_b – плотность крови, кг/м^3 ; C_{pb} – теплоемкость крови, $\text{Дж/кг} \cdot \text{К}$; ω_b – скорость перфузии крови, $\text{кг/м}^3 \cdot \text{с}$; T_a – температура артериальной крови, К ; T – температура компартмента, К ; t – время протекания процесса, с ; r – расстояние, пройденное расчетной точкой от ядра компартмента, м ; R – расстояние до граничного значения компартмента, м .

Теплообмен между телом и окружающей средой осуществляется через кожу посредством теплопроводности, конвекции, излучения и испарения. Также следует отметить, что происходит дополнительный теплоперенос дыхательным трактом за счет конвекции и испарения.

Таким образом, граничные условия биотеплового уравнения (1) для ядра компартмента формулируются следующим образом:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad -k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = q_C + q_R + q_E \equiv q(t, r, T) \Big|_{r=R}. \quad (2)$$

где q_C – удельная величина конвективного теплопереноса; q_R – удельная величина теплопереноса излучением; q_E – удельная величина теплопереноса испарением [3, с. 42].

Удельная величина конвективного теплопереноса q_C рассчитывается через конвективный тепловой поток на единицу площади:

$$q_C = h_{C,mix} (T_{sk} - T_{env}), \quad (3)$$

где T_{sk} – локальная температура поверхности кожи, К ; T_{env} – температура окружающей среды, К ; $h_{C,mix}$ – коэффициент теплоотдачи, учитывающий вклад как натуральной так и вынужденной конвекции, $\text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.

Удельная величина теплопереноса излучением q_R рассчитывается через лучистый тепловой поток на единицу площади:

$$q_R = h_R (T_{sk} - T_{wall}), \quad (4)$$

где h_R – коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м²·К), T_{wall} – температура переизлучающих поверхностей стен, К.

В качестве основы для расчета внутренней терморегуляции используется модель D. Fiala [6]. Поэтому при определении теплотерь при испарении учитывается диффузия влаги через кожу из потовых желез, скорость образования влаги (пот) на поверхности кожи, влажность окружающего воздуха. Удельная величина теплопереноса испарением q_E рассчитывается через соответствующий тепловой поток на единицу площади. Условие аккумуляции пота на поверхности кожи определяется отношением скорости образования пота и скорости его испарения. Учет теплового экранирования и сопротивления влагопереносу одежды может быть произведен посредством уточнения коэффициентов теплопередачи. Таким образом, для частей тела, покрытых одеждой, тепловой поток с учетом конвективной и лучистой составляющих q_{C+R}^{clo} с помощью коэффициента теплоотдачи h_{clo} может быть записан в виде

$$q_{C+R}^{clo} = h_{clo} (T_{sk} - T_{op}), \quad (5)$$

где

$$T_{op} = \frac{h_R T_{wall} + h_{C,mix} T_{env}}{h_R + h_{C,mix}}. \quad (6)$$

Общий алгоритм моделирования тепло- и влагопереноса в системе «человек – одежда – окружающая среда» включает в себя ряд шагов, которые относятся к расчету внутреннего состояния тела человека при учете наличия дополнительного компартамента в виде одежды как прослойки между окружающей средой и поверхностью кожи. Контрольным параметром для определения условий теплового комфорта является температура поверхности кожи T_{sk} . В зависимости от ее изменения включаются управляющие механизмы терморегуляции (потоотделение, дрожание, изменение метаболизма и интенсивности кровотока). На рисунках 2 и 3 показаны примеры интерфейса, реализующего приведенный алгоритм программного обеспечения «Тепловой комфорт», который в настоящее время создается в рамках задания «Разработка научно обоснованных методов исследования механизмов теплопередачи в системе «Человек – Защитная одежда – Внешняя среда» Государственной программы научных исследований «Информатика, космос и безопасность» (2018–2019 гг.).

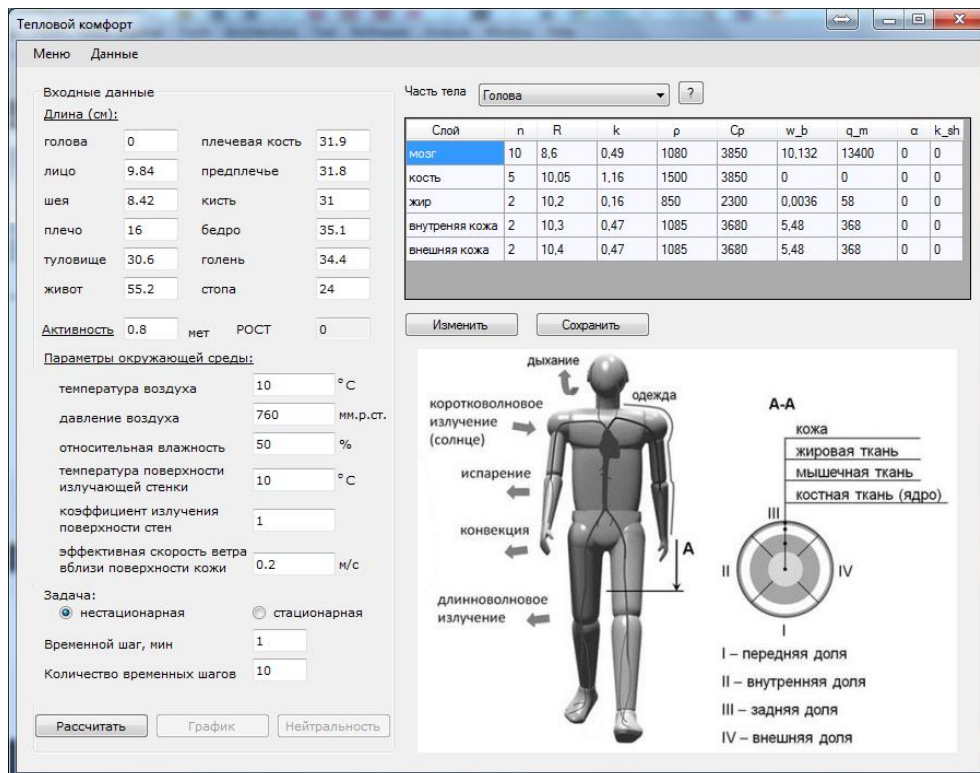


Рисунок 2. – Вид меню ввода данных программного обеспечения «Тепловой комфорт»

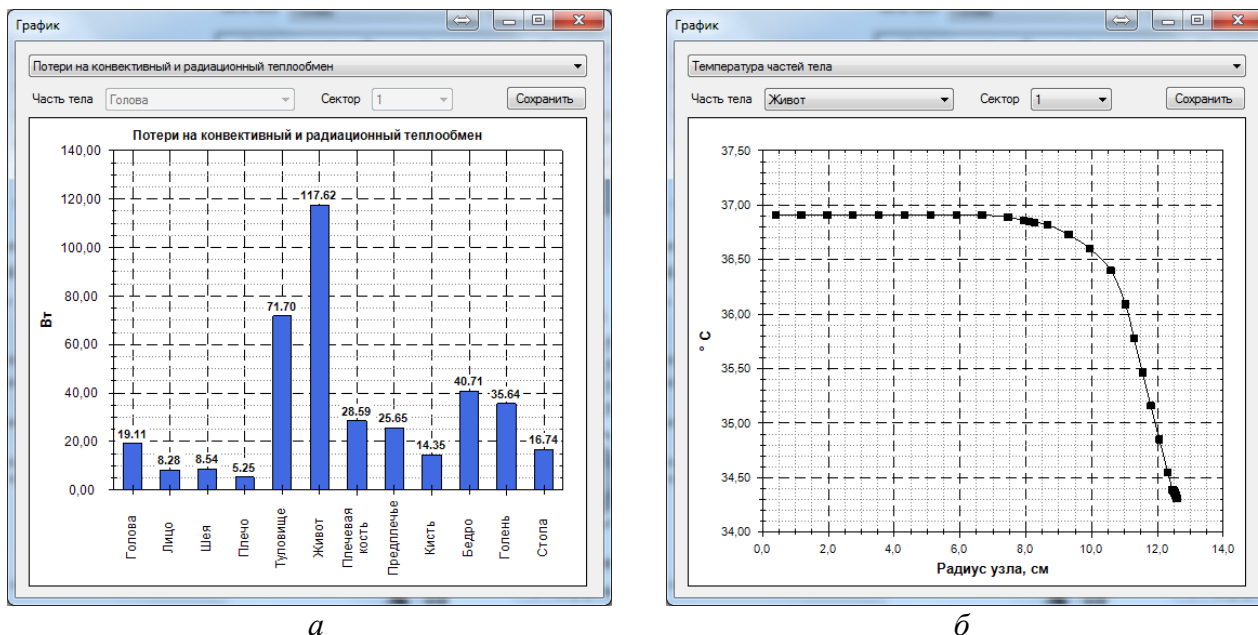


Рисунок 3. – Пример вывода расчетных данных в виде гистограммы (а) и графика (б) в программном обеспечении «Тепловой комфорт»

Комплексная оценка качества одежды специальной защитной пожарных. Научно-практическим центром Витебского областного управления МЧС Республики Беларусь разработаны и введены в действие два государственных стандарта Республики Беларусь: СТБ 1971-2009 «Система стандартов безопасности труда. Одежда пожарных боевая. Общие технические условия» и СТБ 1972-2009 «Система стандартов безопасности труда. Одежда пожарных специальная от повышенных тепловых воздействий. Общие технические условия», которые охватывают порядка 80 методов испытаний.



Рисунок 4. – Лаборатории научно-практического центра Витебского областного управления МЧС Беларуси для проведения испытаний средств индивидуальной защиты пожарных (ВУ/112 1.0192)

Разработка технических нормативных правовых актов, создание и аккредитация лаборатории для проведения испытаний средств индивидуальной защиты пожарных (рис. 4) проводились совместно с Ю.Г. Русецким, А.В. Меньших, А.А. Старовойтовым, В.В. Гнутенко, А.В. Щербаковым.

Следует отметить, что сегодня активно внедряются новые методы исследования свойств (экспресс-методы) специальной защитной одежды, которые позволяют проводить оценку и прогнозирование физико-механических и теплофизических свойств материалов и их пакетов в составе такой одежды. Данные методы направлены на оценку безопасного срока эксплуатации специальной защитной одежды как готового изделия при помощи неразрушающих методов контроля, в том числе в процессе ее эксплуатации.

Совместно с А.А. Кузнецовым и А.М. Гусаровым проведен комплекс исследований по оценке защитных свойств после многоциклового воздействия в процессе эксплуатации одежды специальной защитной на примере боевой одежды пожарных [7, 8, 9].

Для теоретического описания процесса снижения устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов специальной защитной одежды при эксплуатации используется основной физический принцип теории надежности Н.М. Седякина.

Применительно к процессу снижения устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов одежды при эксплуатации применен основной физический принцип теории надежности, который представлен в дифференциальной форме следующим образом:

$$\frac{d\tau}{dn} = -M [\tau - \tau_{кр}]^k, \quad (7)$$

где $\tau(n)$ – текущее значение устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов одежды после n циклов нагружения, с; $\tau_{кр}$ – критическое значение устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов одежды, при достижении которого происходит разрушение наружной поверхности материала верха защитной одежды пожарных, с; M – параметр модели, отражающий темп изменения устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов одежды специальной защитной; k – параметр модели, принимающий значение 1, 2, ...

Проинтегрируем дифференциальное уравнения (7) при $k = 1$:

$$\int_{\tau_0}^{\tau} \frac{d\tau}{\tau - \tau_{кр}} = -M \int_0^n dn \Rightarrow \ln \left| \frac{\tau - \tau_{кр}}{\tau_0 - \tau_{кр}} \right| = -Mn.$$

В итоге имеем

$$\tau(n) = \tau_{кр} + (\tau_0 - \tau_{кр})e^{-Mn}, \quad (8)$$

где τ_0 – начальное значение устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов одежды, с.

Для определения физического смысла параметра M модели (8) предполагается, что существует такое число циклов нагружения $n_{ср}$, при котором

$$\tau(n_{ср}) = (\tau_{кр} + \tau_0) / 2. \quad (9)$$

Тогда, подставив соотношение (9) в (8) и преобразовав, получим

$$M = \frac{\ln 2}{n_{ср}}. \quad (10)$$

Следовательно, параметр M модели (8) определяет количество циклов нагружения $n_{ср}$ одежды, необходимых для выполнения условия (9).

С другой стороны, переписав (8) в виде $\frac{\tau(n) - \tau_{кр}}{\tau_0 - \tau_{кр}} = e^{-Mn}$ и приняв $M = 1/n$ получим

$$\frac{\tau(n) - \tau_{кр}}{\tau_0 - \tau_{кр}} = \frac{1}{e},$$

где n – количество циклов нагружения, по истечении которых текущее значение устойчивости к воздействию теплового потока меньше начального значения устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов одежды до разрушения наружной поверхности материала верха в e раз.

Подставив соотношение (10) в модель (8) и положив $m = n/n_{ср}$, получим:

$$\tau(m) = \tau_{кр} + (\tau_0 - \tau_{кр})e^{-Gm}, \quad (11)$$

где m – число циклов нагружения одежды при эксплуатации; G – константа модели, имеющая постоянное значение $G = \ln 2$.

Введя обозначения

$$Y(m) = \frac{\tau(m)}{\tau_0}; \quad Y_0 = \frac{\tau_{кр}}{\tau_0}, \quad (12)$$

математическую модель (11) можно представить в безразмерной форме

$$Y(m) = Y_0 + (1 - Y_0)e^{-G \cdot m}, \quad (13)$$

где $Y(m)$ – параметр модели, характеризующий долю устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов после m циклов нагружения относительно начального значения устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов одежды; Y_0 – параметр модели, определяющий долю критического значения устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов к начальному значению устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов одежды.

Решение дифференциального уравнения (7) при $k = 2$ имеет вид

$$\tau(n) = \frac{(\tau_0 - \tau_{кр})\tau_{кр}Mn + \tau_0}{1 + (\tau_0 - \tau_{кр})Mn}. \quad (14)$$

После подстановки условия (9) в модель (14) и преобразований темповый параметр M модели (14) определяется следующим соотношением:

$$M = \frac{1}{n_{ср}(\tau_0 - \tau_{кр})}. \quad (15)$$

Окончательно получим

$$\tau(m) = \frac{m\tau_{кр} + \tau_0}{1 + m} \quad (16)$$

или в безразмерной форме

$$Y(m) = \frac{mY_0 + 1}{1 + m}. \quad (17)$$

При этом физический смысл параметров $Y(m)$, Y_0 данной математической модели определяется соотношением (13).

Представление математических моделей (8), (14) в безразмерной форме (13) и (11), соответственно, позволяет заменить семейство моделей, обладающих различными значениями темпового показателя M (рис. 5).

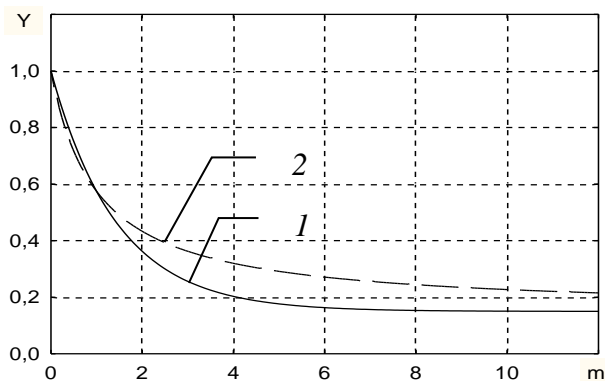


Рисунок 5. – Устойчивость к воздействию теплового потока пакета материалов одежды (при $Y_0 = 0,15$): 1 – кривая, построенная по модели (13), 2 – кривая, построенная по модели (17)

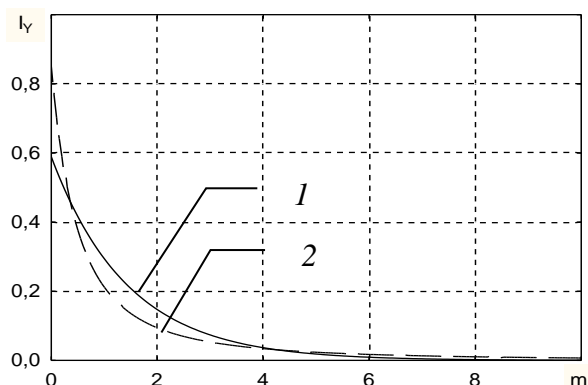


Рисунок 6. – Интенсивность процесса снижения устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов одежды при эксплуатации ($Y_0 = 0,15$): 1 – для модели (18), 2 – для модели (19)

Интенсивность процесса снижения устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов одежды при эксплуатации вычисляется по формуле $I_Y(m) = dY(m)/dm$ и принимает вид

$$I_Y(m) = G|Y_0 - 1|e^{-G \cdot m} \quad \text{при } k = 1; \quad (18)$$

$$I_Y(m) = \frac{|Y_0 - 1|}{(1 + m)^2} \quad \text{при } k = 2. \quad (19)$$

Заключение. Предложен метод построения модели тепловлагопереноса в системе «человек – защитная одежда – внешняя среда», которая базируется на компартментном подходе. Тело человека представлено набором элементов со специальным компартментом с учетом системы кровообращения и компартментом со слоями одежды. Физико-математическая модель теплового баланса сформулирована с включением уравнений теплопереноса и уравнения для переноса влаги. Модель позволяет производить моделирование тепло и влагопереноса в системе «человек – защитная одежда – внешняя среда» с учетом внутреннего состояния тела человека при учете компартмента защитной одежды пожарных.

В результате теоретического анализа закономерностей изменения теплофизических свойств пакета материалов защитной одежды пожарных при эксплуатации представлены математические модели взаимосвязи устойчивости к воздействию теплового потока пакета материалов и количества циклов нагружения, применение которых позволит осуществить прогноз срока службы защитной одежды пожарных при эксплуатации по результатам экспресс-методов исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конституция Республики Беларусь: с изм. и доп., принятыми на респ. референдумах 24 нояб. 1996 г. и 17 окт. 2004 г. – Минск: Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь, 2016. – 62 с.
2. Логинов, В.И. Конструирование и комплексная оценка качества специальной защитной одежды пожарных: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.03 / В.И. Логинов; Всерос. науч.-исслед. ин-т противопожар. обороны. – М., 2010. – 48 с.
3. Моделирование тепловлагопереноса в системе «человек – одежда – окружающая среда» с учетом внутренней терморегуляции при разработке специальной защитной одежды для проведения аварийно-спасательных работ, не связанных с тушением пожара: отчет о НИР (заключ.) / ИТМО НАН Беларуси; рук. А.Д. Чорный. – Минск, 2017. – 72 с. – № ГР 20170923.
4. Parsons, K. Human Thermal Environments: the Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance / K. Parsons. – London: Taylor & Francis, 2003. – 560 p.
5. Pennes, H.H. Analysis of tissue and arterial blood temperature in the resting human forearm / H.H. Pennes // J. Appl. Physiol. – 1948. – Vol. 1. – P. 93–122.
6. Fiala, D. Physiological modeling for technical, clinical and research applications / D. Fiala [et al.] // Frontiers in Bioscience. – 2010. – Vol. S2. – P. 939–968.
7. Кузнецов, А.А. Оценка и прогнозирование физико-механических свойств текстильных нитей / А.А. Кузнецов, В.И. Ольшанский. – Витебск: ВГТУ, 2004. – 226 с.
8. Разработка методов оценки и прогнозирования физико-механических и теплофизических свойств огнестойких материалов при эксплуатации защитной одежды пожарных: отчет о НИР (заключ.) / ВГТУ; рук. А.А. Кузнецов. – Витебск, 2012. – 125 с. – № ГР 20110862.
9. Гусаров, А.М. Оценка и прогнозирование показателей теплофизических свойств пакетов для боевой одежды пожарных: дис. ... канд. техн. наук : 05.19.01 / А.М. Гусаров. – Витебск, 2016. – 242 л.

BASIS OF DESIGN AND QUALITY ASSURANCE OF THE SPECIAL PROTECTIVE CLOTHING OF FIRE FIGHTERS

Nikolai Dmitrakovich, PhD in Technical Sciences

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus», Minsk, Belarus

Purpose. Increase the level of combat readiness of agencies and units for emergency situations, fire-fighters and rescuers workplace safety by improving personal protective equipment. Development and application of innovative methods of design and quality assessment.

Methods. The method of the compartmental approach is applied, which allows to proceed to a quantitative assessment of the transport processes, both for individual parts and on their basis of the human body as a whole. For such an analysis, it is necessary to determine the ways of heat production and heat transfer with the formulation of equations including terms that can be measured or estimated. The complex of studies on the evaluation of protective properties after multicycle impact during the operation of clothing with a special protective was carried out.

Findings. The method for constructing a heat and moisture transfer model in the system «human – protective clothing – external environment» was proposed. The human body is represented by a set of elements with a special compartment taking into account the circulatory system and a compartment with layers of clothing. The physico-mathematical model of the heat balance is formulated with the inclusion of heat transfer equations and the equation for moisture transfer. The model makes it possible to simulate heat and moisture transfer in the system «human – protective clothing – external environment», taking into account the internal state of the human body considering the compartment of protective clothing of firefighters.

Application field of research. As a result of the theoretical analysis of the regularities in the changes in the thermophysical properties of the fire protective clothing package during operation, mathematical models of the relationship between the resistance to the heat flux of a package of materials and the number of loading cycles are presented. Their application will make it possible to predict the life expectancy of firefighters protective clothing during operation by the results of rapid research methods.

Conclusions. A physico-mathematical model that allows modeling heat and moisture transfer in the «human – protective clothing – external environment» system, taking into account the internal state of the human body when considering an additional compartment-protective clothing was formulated. The models that take into account the relationship of resistance to heat flow from the special protective clothing thermal number of cycles was given.

Keywords: special protective of clothing, the compartment, the thermoregulation, thermal comfort.

(The date of submitting: August 13, 2018)

REFERENCES

1. *The Constitution of the Republic of Belarus: with amendments and additions adopted at the republican referendums on November 24, 1996 and October 17, 2004.* Minsk: National Center of Legal Information of the Republic of Belarus, 2016. 62 p. (rus)
2. Loginov V.I. *The design and comprehensive assessment of the quality of special protective clothing firefighters.* Grand PhD tech. sci. diss. Synopsis: 05.26.03. All-Russian Research Institute for Fire Protection. Moscow, 2010. 48 p. (rus)
3. *Simulation of heat and moisture transport in the «man – clothes – environment» system, taking into account the internal thermoregulation in the development of special protective clothing for rescue operations not related to fire extinguishing.* Report of research (final). A.V. Luikov heat and mass transfer institute of the National Academy of Sciences of Belarus; hands. A.D. Chorny. Minsk, 2017. 72 p. State registration No. 20170923. (rus)
4. Parsons K. *Human Thermal Environments: the Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance.* London: Taylor & Francis, 2003. 560 p.
5. Pennes H.H. Analysis of tissue and arterial blood temperature in the resting human forearm. *J. Appl. Physiol.* 1948. Vol. 1. P. 93–122.
6. Fiala D. et al. Physiological modeling for technical, clinical and research applications. *Frontiers in Bioscience.* 2010. Vol. S2. P. 939–968.
7. Kuznetsov A.A., Ol'shanskiy V.I. *The estimation and forecasting of physical and mechanical properties of textile yarns.* Vitebsk: VGTU, 2004. 226 p. (rus)
8. *The development of methods for assessing and predicting the physico-mechanical and thermophysical properties of fire-resistant materials in the operation of fire protective clothing.* Report of research (fi-

- nal). Vitebsk State Technological University; hands. A.A. Kuznetsov. Vitebsk, 2012. 125 p. State registration No. 20110862. (rus)
9. Gusarov A.M. *The evaluation and forecasting of indicators of thermophysical properties of packages for combat clothing of firefighters*. PhD tech. sci. diss.: 05.19.01. Vitebsk, 2016. 242 p. (rus)