

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.352>

УДК 614.895.5

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЕ

Дмитракович Н.М., Жук Д.В.

Цель. Провести обзор моделей по определению теплофизических и физиологических показателей состояния человека в защитной одежде путем моделирования тепло-массообменных систем.

Методы. Разбор подходов по определению теплопереноса в защитной одежде путем обзора научных работ по исследуемому направлению.

Результаты. Проведен анализ методик по определению теплофизических и физиологических показателей состояния человека в защитной одежде путем моделирования тепло-массообменных систем, определены необходимые условия для получения данных испытаний и сравнения с данными расчета.

Область применения исследований. Результаты исследований могут быть использованы в разработке, исследовании и оптимизации методик по определению теплофизических и физиологических показателей состояния человека в защитной одежде пожарных путем моделирования тепло-массообменных систем.

Ключевые слова: одежда специальная защитная пожарных, метаболизм, коэффициент теплопроводности, тепловой поток, теплоперенос.

(Поступила в редакцию 18 января 2021 г.)

Введение

Разработка специальной экипировки и снаряжения является актуальной задачей для многих отраслевых направлений производства любой страны. Защита человеческого организма, выполнение специализированных работ и поддержание физиологического комфорта невозможны без применения специальной защитной одежды. Одной из основных функций одежды является защита организма человека от колебаний температуры внешней среды. До настоящего времени актуальна проблема разработки специального защитного обмундирования для спасателей-пожарных в условиях перепада температур от высоких положительных до отрицательных значений, в то время как организм стремится поддерживать постоянную температуру.

Традиционно защитная одежда от температурного воздействия состоит из базового комплекта материалов: материал верха, изолятор, материал подложки. В зависимости от специфики выполнения работ и направления применения одежды пакет материалов может дополняться. Состав одежды создает барьерную среду между организмом спасателя-пожарного и внешней средой. Прогнозирование защитных функций одежды путем расчетного моделирования процесса сложного теплопереноса в защитной одежде является актуальным.

Основная часть

В работе [1] P.W. Gibson представил результаты оценки характеристик теплозащитных тканей и одежды на лабораторных установках, исследований их теплофизических свойств на манекене и полигонных испытаний. Основываясь на результатах работы [1], группа зарубежных исследователей разработала различные аналитические и численные модели метаболического переноса тепла, влаги и ее паров через одежду в окружающую среду [1–11]. Эти модели предоставляют возможность для проведения исследований метаболического тепла и передачи избыточной влаги посредством потовыделения через одежду пожарных.

Аналитическая модель

В работе [3] разработана упрощенная аналитическая модель передачи теплоты и избыточной влаги посредством потовыделения через одежду в окружающую среду (рис. 1).

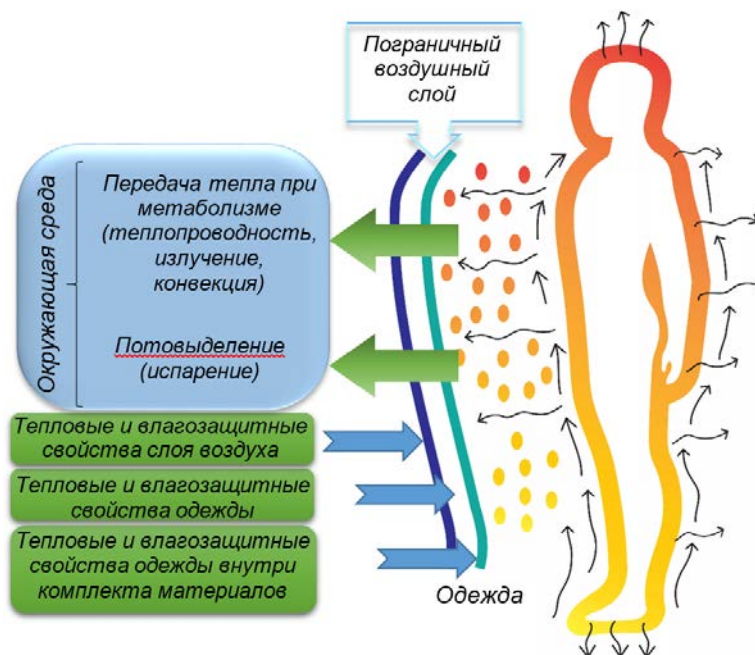


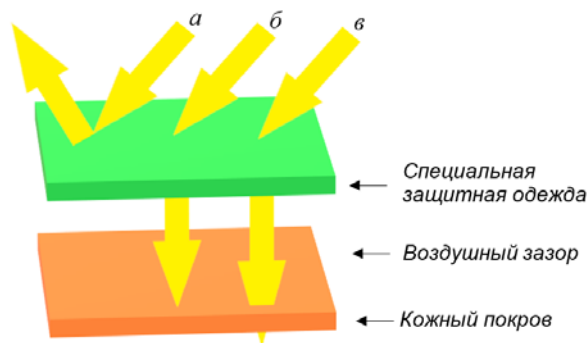
Рисунок 1. – Модель передачи метаболического тепла и рассеивания паров при потовыделении

Выделяемая теплота в результате метаболических реакций организма человека может легко передаваться одежде через область микроклимата посредством теплопроводности, излучения и конвекции [3]. Затем теплота передается внутрь одежды и достигает ее внешней поверхности, в зависимости от характеристик (внутренняя теплоемкость, вес, толщина и т.д.) тканей, используемых в одежде. Наконец, от внешней поверхности одежды в окружающую среду передача происходит за счет теплопроводности, конвекции и излучения. Этот процесс зависит от разницы температур между человеческим телом и окружающей средой. Пары при потовыделении в первую очередь переходят от человеческого тела к одежде, в зависимости от свойств ткани (впитывающая влага, впитывание, собственное сопротивление испарению и т.д.), используемой в одежде, а потом испаряются во внешнюю среду. Пары при потовыделении могут легко достигать внешней поверхности одежды, если одежда имеет высокую паронепроницаемость [3].

Согласно работам [3–5] тепловую энергию окружающей среды, распространяющуюся на ткань одежды, можно представить в виде отраженной или испускаемой тепловой энергии, поглощенной и передаваемой тепловой энергии (рис. 2). Кроме того, значительное количество поглощенной тепловой энергии в пакете материалов может снова передаваться через ткани путем теплопроводности.

В целом отражательная способность, коэффициент излучения, поглощающая способность и коэффициент теплопроводности являются основными параметрами ткани, которые могут влиять на передачу тепловой энергии через ткань и могут влиять на теплозащитные характеристики специальной одежды [8].

Массообмен возникает при воздействии расплавленных веществ, горячих жидкостей и парообразовании при потовыделении [9; 10].



а – отраженная / испускаемая тепловая энергия, *б* – поглощенная тепловая энергия, *в* – передаваемая тепловая энергия

Рисунок 2. – Принципиальная схема распространения тепловой энергии внешней среды через специальную защитную одежду на организм человека

Численные модели

А.Н. Woodcock в работе [2] численно проанализировал теплоту реакций метаболизма и передачу паров при потовыделении через обычную одежду в окружающую среду. Он предположил, что общий перенос теплоты H_t от человеческого тела в окружающую среду представляет собой комбинацию передачи теплоты H_d и потери теплоты от испарения паров при потовыделении H_e :

$$H_t = H_d + H_e. \quad (1)$$

Тепло H_d может переноситься конвекцией или излучением на основании закона охлаждения Ньютона. Кроме того, H_d может передаваться теплопроводностью при увеличении перепада температуры.

После выдвинутого в работе [2] предположения многие исследователи численно моделировали теплоту человеческого тела и передачу паров при потовыделении через ткань или одежду. Например, разработана численная модель конвективной и диффузионной теплопередачи с фазовым переходом при конденсации и испарении [10]; разработана динамическая численная модель, зависящая от времени, включающая перенос теплоты за счет теплопроводности и излучения, а также перенос паров при потовыделении и пара за счет диффузии [11]; представлена численная модель динамического метаболического переноса тепла и паров при потовыделении в одежде во взаимодействии с двухузловыми моделями терморегуляции человека [12]; разработана подробная динамическая численная модель теплообмена и переноса паров при потовыделении и избыточной влаге, а также осуществлено сравнение результатов, предсказанных моделью с экспериментальными результатами проверки модели [13; 14]; в работах [3; 14] представлена численная модель переноса теплоты и паров при потовыделении в многослойной одежде с учетом различных параметров:

$$C_{\text{од}} \frac{dT_{\text{од}}}{dt} = Q_T^c + Q_T^e - Q_{\text{ср}}^c - Q_{\text{ср}}^e - Q_{\text{ср}}^r + Q_{\text{ср}}^s, \quad (2)$$

где $C_{\text{од}}$ – теплоемкость одежды, Дж/К;

$T_{\text{од}}$ – температура одежды, К;

Q_T^c , Q_T^e – количество передаваемой теплоты от тела человека к одежде за счет конвекции и испарения в единицу времени соответственно, Вт;

$Q_{\text{ср}}^c$, $Q_{\text{ср}}^e$, $Q_{\text{ср}}^r$ – количество передаваемой теплоты от одежды к окружающей среде за счет конвекции, испарения и излучения в единицу времени соответственно, Вт;

$Q_{\text{ср}}^s$ – возможный приток теплоты из-за солнечного излучения в единицу времени, Вт.

Особую популярность в зарубежном научном сообществе имеют три численные модели теплопередачи и массопереноса (модель *P.W. Gibson* [1], модель *D.A. Torvi* [16], модель *W.E. Mell* и *J.R. Lawson* [7]).

Модель *P.W. Gibson* была разработана на основе теории *S. Whitaker* тепло-массопереноса через пористую среду. Текстильная ткань представлялась как гигроскопическая многофазная пористая среда (твердая фаза с концентрацией связанной воды, свободная жидкая фаза и газовая фаза водяных паров в воздухе) [1]. Эта модель рассматривает тепло-массообмен в трех состояниях: проводимость всеми тремя фазами, конвекция газовой и жидкой фаз и превращения между всеми тремя фазами. Для разработки модели к ткани были применены уравнения непрерывности, сохранения импульса и энергии. В общем виде разработанная *P.W. Gibson* модель представлена выражением (3), где функционально выражена пространственная взаимосвязь плотности, температуры, теплоемкости материала и ряда других параметров, формирующих объемную модель процесса тепло- и массопереноса [1, с. 34].

$$\begin{aligned} \langle \rho \rangle c_p \frac{\partial \langle T \rangle}{\partial t} + \left(\sum_{i=1}^N (c_p)_{i,\sigma} \langle \rho_{i,\sigma} v_{i,\sigma} \rangle + \rho_\beta (c_p)_\beta \langle v_\beta \rangle + \sum_{j=1}^N (c_p)_{j,\gamma} \langle \rho_{j,\gamma} v_{j,\gamma} \rangle \right) \cdot \nabla \langle T \rangle + \\ + \sum_{i=1}^N \Delta h_{\text{vap},i} \langle \dot{m}_{\text{lv}} \rangle + Q_1 \langle \dot{m}_{\text{sl}} \rangle + \left(Q_1 + \sum_{i=1}^N \Delta h_{\text{vap},i} \right) \langle \dot{m}_{\text{sv}} \rangle = \nabla (K_{\text{eff}}(T) \cdot \nabla \langle T \rangle), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\langle \rho \rangle$ – среднееобъемное значение плотности системы человек – защитная одежда – внешняя среда, состоящей из N элементов, кг/м³;

$c_p = c_p(x, T)$ – зависимость удельной теплоемкости в системе человек – защитная одежда – внешняя среда в точке x компонента системы при температуре T в этой же точке при постоянном давлении, Дж/(кг·К);

$\langle T \rangle$ – среднееобъемное значение температуры в системе человек – защитная одежда – внешняя среда, К;

t – время, с;

$(\cdot)_i$ – характеристика i -го компонента системы человек – защитная одежда – внешняя среда;

$(\cdot)_\sigma, (\cdot)_\beta, (\cdot)_\gamma$ – значения характеристики (\cdot) для составляющих системы человек – защитная одежда – внешняя среда, находящихся соответственно в твердой, жидкой и газовой фазах;

$\langle v \rangle$ – среднееобъемное значение скорости десорбции в системе человек – защитная одежда – внешняя среда, м/с;

$\langle \dot{m}_{\text{lv}} \rangle, \langle \dot{m}_{\text{sl}} \rangle, \langle \dot{m}_{\text{sv}} \rangle$ – среднееобъемное значение массовой скорости десорбции веществ компартментов из твердой в жидкую фазу, из твердой в газовую фазу, испарившейся из жидкой фазы на единицу объема, соответственно, кг/(с·м³);

$\Delta h_{\text{vap},i}$ – теплота испарения жидкой фазы веществ в компоненте системы, Дж/кг;

Q_1 – энтальпия десорбции из твердой фазы в компартменте (костный, мышечный, жировой и компартмент защитной одежды) на единицу массы, Дж/кг;

$K_{\text{eff}}(T)$ – эффективная теплопроводность системы, включая защитную одежду, Дж/(с·м·К).

Эта модель была позже расширена с учетом передачи тепла человеческому телу при контакте с тканью [15]. Однако модель требовала модификации, в связи с тем что она недо-

статочно коррелировала с данными, полученными в результате любого эксперимента, смоделированного в лаборатории [1]. Кроме того, эта модель неприменима, когда ткань подвергается воздействию источника теплового потока более 10 кВт/м².

Изложенная в работе [16] модель *D.A. Torvi* напрямую основана на экспериментальной установке по определению тепловых характеристик ткани. Испытательный прибор состоит из ткани, нагреваемой снизу горелкой с использованием предварительно смешанных реагентов (пропана и воздуха), испытательного датчика (медного калориметра), установленного в изолирующем блоке, и полностью закрытого воздушного пространства. В этой модели учитывается передача тепла от горелки через однослойную ткань к медному датчику (кожному покрову). При разработке модели теплопередачи были учтены конвекция и излучение в воздушном зазоре между горелкой и тканью; проводимость, поглощенное излучение и термохимические реакции в ткани; а также конвекция и излучение в воздушном зазоре между тканью и датчиком. Таким образом, в работе [16] представлена формула вычисления лучистого теплового потока q_{rad1} (кВт/м²), приходящегося на единицу площади поверхности одежды:

$$q_{rad1} = \sigma \varepsilon_g T_g^4 - \sigma \varepsilon_f F_a (1 - \varepsilon_g) (T_f^4 - T_a^4) + \frac{\sigma F_b (1 - \varepsilon_g) (T_b^4 - T_f^4)}{1 + F_b (1 - \varepsilon_g) \left(\frac{1 - \varepsilon_f}{\varepsilon_f} + \frac{A_f}{A_b} \frac{1 - \varepsilon_b}{\varepsilon_b} \right)}, \quad (4)$$

где ε_g , ε_f , ε_b – коэффициенты излучения горячих газов, ткани и головки горелки, соответственно;

σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴);

T_g , T_f , T_a , T_b – температуры горячих газов, внешней стороны ткани, окружающего воздуха и головки горелки соответственно, К;

F_a , F_b – коэффициенты обзора, учитывающие геометрию ткани по отношению к окружающему воздуху и горелке соответственно;

A_f , A_b – площади поверхности ткани и головки горелки соответственно, м².

Точно так же представлен лучистый тепловой поток q_{rad2} внутри ткани. Учитывая эти лучистые тепловые потоки q_{rad} , наряду с проводимостью, термохимической реакцией и поглощением падающего излучения внутри ткани, в работе [16] разработано уравнение распределения температуры в системе источник излучения – ткань – приемник (датчик теплового потока) и проведено параметрическое исследование полученной модели. Было обнаружено, что предсказанные моделью результаты хорошо коррелируют с результатами, полученными в лаборатории (в пределах 4 %) [16]. Это демонстрирует, что модель *D.A. Torvi* может быть эффективно использована для прогнозирования повышения температуры ткани при воздействии пламени без проведения каких-либо дорогостоящих и громоздких лабораторных экспериментов. Модель была улучшена [17].

Численная модель, предложенная *W.E. Mell* и *J.R. Lawson* в работе [7], является расширением модели *D.A. Torvi*. В ней рассматривается теплопередача через многослойные ткани, состоящие из оболочки (внешнего слоя), влагобарьера (среднего слоя) и теплоизолятора (внутреннего слоя). Для изучения теплопроводности в слоях ткани исследователи проводили эксперимент, подобный эксперименту работы [16], и получили модель, представленную следующим уравнением:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial q_c}{\partial x} - \frac{\partial q_R}{\partial x} + Q_{in}, \quad (5)$$

где $\partial T / \partial t$ – скорость изменения температуры;

$\partial q_c / \partial x$ – проекция градиента теплового потока через слой ткани на нормаль к поверхности;

$\partial q_R / \partial x$ – проекция градиента лучистого теплового потока через ткань на нормаль к поверхности;

c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К);

Q_{in} – энергия деформации тестируемых тканей на единицу объема, Вт/м³.

В этом соотношении приняты во внимание падающие тепловые потоки с обеих сторон ткани, чтобы учесть межслойный тепловой поток из-за излучения, отраженного между слоями ткани. Разработанная модель может быть использована для точного прогнозирования изменения температуры тканей в зависимости от времени или термозащитных характеристик тканей.

Вышеприведенные модели позволяют численно анализировать теплоту метаболических реакций организма и передачу паров при потовыделении в тканях и многослойной одежде путем анализа тепломассопереноса каждой ткани, однако в конфигурации защитной одежды состав пакета тканей отличается по своим свойствам. Защитная одежда включает разные тканевые материалы, такие как влагобарьерная мембрана, термоподкладка, огнеупорная ткань. В связи с этим моделирование теплоты метаболических реакций организма и передачи паров при потовыделении через защитную одежду требует более комплексного и частного подхода.

Недостатком данных моделей является расчет пакета материалов с известными характеристиками при известных температурах на верхнем слое и температуре пододежного пространства, при котором упускается вопрос изменения температуры на поверхности тела за счет метаболизма и циркуляции крови.

Кроме того, модели были разработаны с учетом естественной окружающей среды, в то время как для рабочей среды пожарных характерны тепловые воздействия различной интенсивности, что может серьезно повлиять на выделяемую теплоту метаболических реакций и способность одежды переносить избыточную влагу и пар. Этот факт в целом оказывает влияние на тепловой стресс организма спасателя-пожарного. Однако рассмотренные методики позволяют производить расчеты для специальной защитной одежды, не связанной с тушением пожаров.

Компартментный подход

Чтобы изучить реакции человеческого организма с учетом анатомических, физиологических и теплофизических особенностей на изменение внешних условий при использовании рассматриваемого типа одежды, необходимо рассмотреть тело человека как условно разбитого на N элементарных компонентов в виде простых геометрических фигур (сфера, цилиндр, пластина), называемых компартментами. Тепловые процессы описываются через последовательность математических зависимостей, основанных на специальных алгоритмах терморегуляции, устанавливающих связь как между компартментами, так и с окружающей средой. Каждый из компартментов представляется набором K слоев с J ячейками (долями), соответствующих, например, коже, мышечной, костной и другим тканям [18; 19] (рис. 3).

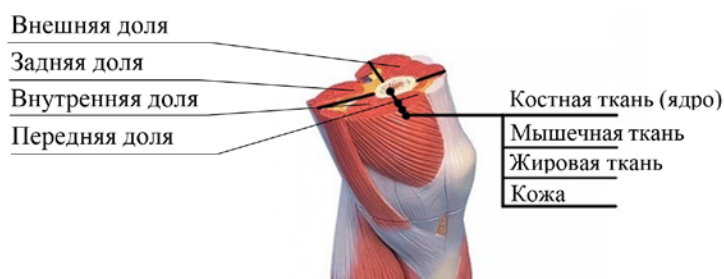


Рисунок 3. – Схема разбивания конечности человека на элементарные компоненты

Система кровообращения обычно выступает в качестве дополнительного компартмента особого типа. Одежда с прослойками воздуха между кожей и ее внутренней поверхностью может рассматриваться либо как дополнительный компартмент со слоями, либо учитывается 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 массопереноса и теплоты как для отдельных частей, так и на их основе тела человека в целом. Для такого анализа, исходя из концептуального уравнения теплового баланса, следует определить пути теплопродукции и теплоотдачи с формулировкой уравнений, включающих члены, которые могут быть измерены или оценены [18].

Компартментные модели в системе человек – защитная одежда – внешняя среда можно разбить на два класса: тепло- и массопереноса. Для первого класса моделей при условном разделении организма на компартментны для отдельной k -й ткани n -го компартмента уравнение теплового баланса можно записать в виде дифференциального уравнения:

$$C_{kn} \frac{\partial T_{kn}}{\partial t} = Q_{kn}^M + Q_{kn}^K \pm Q_{kn}^B \pm Q_{kn}^C \pm Q_{kn}^R - Q_{kn}^E - Q_{kn}^{Sk} + Q_{kn}, \quad (7)$$

где C_{kn} – теплоемкость слоя ткани, Дж/К;

T_{kn} – температура слоя ткани, К;

t – время, с;

$Q_{kn}^M = F(\rho_{O_2})$ – количество тепла, образуемое в единицу времени за счет метаболических процессов и зависящее от плотности кислорода ρ_{O_2} (кг/м³), Вт;

$Q_{kn}^K = S_{kn} a_{kn} (T_{kn} - T_t)$ – количество тепла, рассеиваемое в единицу времени за счет теплопроводности соседних слоев тканей, Вт;

S_{kn} – эффективная площадь поверхности рассматриваемого объема ткани, м²;

a_{kn} – локальный коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К);

T_t – температура соседних слоев ткани, К;

$Q_{kn}^B = \rho_B C_B \omega_B (T_B - T_{kn})$ – количество тепла в единицу времени, определяемое конвективным переносом тепла кровотоком, Вт;

$\rho_B, C_B, \omega_B, T_B$ – плотность, удельная теплоемкость, объемная скорость и температура крови, кг/м³, Дж/(кг·К), м³/с, К;

$Q_{kn}^C = S_{kn} h_{kn} (T_{kn} - T_a)$ и $Q_{kn}^R = S_{kn} \sigma \epsilon_{kn} (T_{kn}^4 - T_a^4)$ – количество тепла в единицу времени, выделяемое конвективным и радиационным теплообменом в окружающую среду, Вт;

h_{kn} – локальный коэффициент конвективного теплообмена, Вт/(м²·К);

T_a – температура окружающей среды, К;

ϵ_{kn} – коэффициент излучения поверхности ткани (порядка 0,88...0,92);

$Q_{kn}^E = f(V, n, d)$ – количество тепла в единицу времени, выделяемое за счет испарения с верхних дыхательных путей и зависящее от частоты дыхания n (раз в с), вентилируемого объема легких V (м³), разницы влагосодержания вдыхаемого и выдыхаемого воздуха d (%), Вт;

$Q_{kn}^{Sk} = S_{kn} h_{kn}^E (P_{kn} - P_a)$ – количество тепла в единицу времени, выделяемое за счет испарения с поверхности кожи, Вт;

h_{kn}^E – коэффициент теплоотдачи испарением, Вт/(м²·К);

P_{kn} и P_a – давление паров воды, насыщенных при температуре ткани и окружающей среды, соответственно, Па;

Q_{kn} – количество тепла в единицу времени, выделяемое другими факторами (работа, активность и т.д.), Вт.

Другой класс моделей строится на применении дифференциального уравнения в частных производных с соответствующими граничными условиями. Модель была предложена в стационарной формулировке в 1948 г. *H.H. Pennes* [20]. Он применил ее для исследования тепловых процессов в предплечье, представленном в виде цилиндра, с учетом радиальной теплопроводности, метаболического выделения тепла в ткани, конвективного теплопереноса за счет циркулирующей крови и теплоотдачи с поверхности кожи (боковой поверхности цилиндра) путем конвекции, излучения и испарения. Дифференциальное уравнение, описывающее модель *H.H. Pennes*, в одномерном приближении имеет вид:

$$\rho_{\text{kn}} c_{\text{kn}} \frac{\partial T_{\text{kn}}}{\partial t} = k \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_{\text{kn}}}{\partial r} \right) + q^B + q^M, \quad (8)$$

где ρ_{kn} – плотность слоя ткани, кг/м³;

k – теплопроводность в тканях организма человека, Дж/(с·м·К);

c_{kn} – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);

r – радиус компартмента, м.

q^B – количество теплоты на единицу объема, переносимое кровяным потоком, Вт/м³;

q^M – количество теплоты на единицу объема, выделяемое при метаболических реакциях в организме, Вт/м³.

Как видно из уравнений (7) и (8), степень разбиения на компартменты и изменение теплофизических параметров слоев тканей человеческого тела в зависимости от состояния организма, условий окружающей среды и индивидуальных особенностей делают сложной математическую модель тепловых процессов в организме. Наличие активных процессов терморегуляции и дополнительного компартмента в виде одежды усложняет данную модель [18; 20].

Компартментный подход с разным уровнем разбиения

Уравнения (7) и (8) служат основой для всех моделей определения теплового состояния организма человека. Их различие заключается прежде всего в степени дискретизации по количеству компартментов и их слоев. Можно выделить четыре уровня дискретизации.

На первом уровне для оценки теплового комфорта в стационарных условиях окружающей среды человеческое тело представляется в виде одного глобального компартмента. Модели, использующие этот подход, представляют собой уравнение, аналогичное биотепловому уравнению, с заданием входящих в него компонентов на основе анализа доступных экспериментальных данных [21].

Второй уровень дискретизации основан на введении понятий ядра и оболочки. В работе [21] представлена одна из первых нестационарных моделей такого рода, использующая для анализа величину ректальной температуры (температуры ядра) и средней температуры кожи (оболочки). Основываясь на уравнении теплового баланса и установив зависимость скорости теплопродукции от приращения температуры ядра и оболочки, модель работы [22] обеспечивает связь между температурой кожи, влажностью кожи, локальным метаболизмом и параметрами окружающей среды.

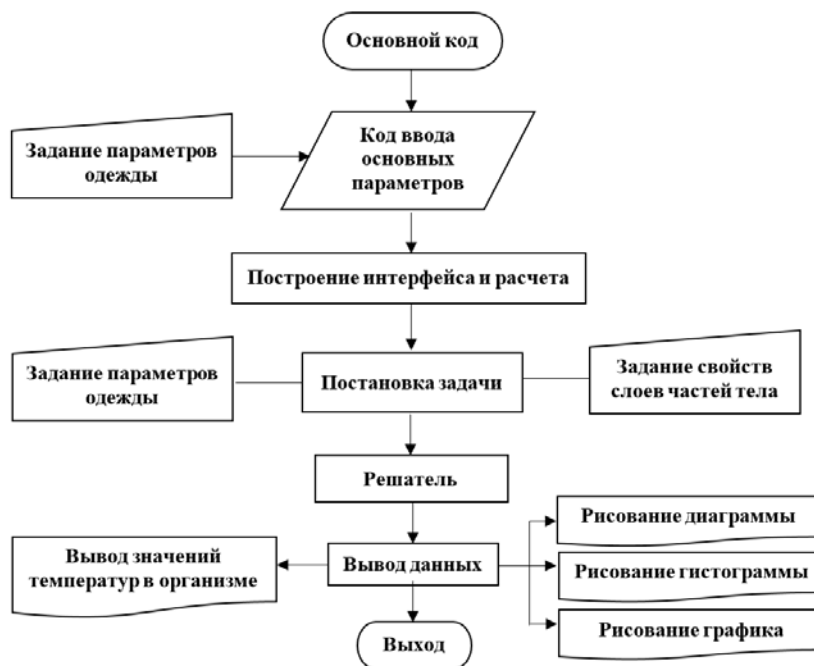
Следующий шаг усложнения моделей за счет разбиения состоял в использовании подхода, предложенного в работе [23], где виртуальное тело состояло из 6 цилиндров, обозначающих туловище, руки, ноги и голову. Для каждого цилиндра записывалось уравнение теплового баланса с дополнительными связями с компартментом, соответствующим ядру тела

(сердце и легкие). Шестикомпартментная модель работы [23] использовалась в [13], где каждый компартмент состоял из четырех элементов (слоев) (костная, мышечная, жировая ткани и кожа), а седьмой компартмент был ответственен за систему кровообращения и связь остальных элементов. Таким образом, модель состояла из 25 элементов с 25 основными уравнениями теплового баланса. В этой модели тепло передается через ткани в отдельных слоях посредством проводимости. Через кожу происходит теплообмен с окружающей средой через конвекцию, излучение, испарение и дыхание. Теплообмен между локальными слоями тканей и кровотоком представлен в упрощенном виде как теплообмен между локальными тканями и компартментом системы кровообращения. Кроме того, предложенная в работе [13] модель учитывает механизмы терморегуляции посредством обработки сигналов о температуре всех элементов и сравнением их с контрольными значениями (*set-points*). Модель была скрупулезно проанализирована и ее обоснованность была доказана с физиологической точки зрения [24], что подтверждает ее востребованность в настоящее время [25].

Рассматриваемая модель продолжает развиваться в направлении увеличения разбиения тела человека [24]. Это связано с возрастанием мощности вычислительных ресурсов, что позволяет представлять и моделировать виртуальное тело человека достаточно реалистично и проводить подробный анализ различного рода специфических эффектов, влияющих на тепловой комфорт, в том числе функциональных особенностей одежды [26].

На основании модели многокомпартментного подхода по определению тепломассопереноса в организме спасателя, а также через защитную одежду Университетом гражданской защиты МЧС Беларуси совместно Институтом тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси был разработан алгоритм (рис. 4) и программный код специального программного обеспечения «ТОРС»¹ в рамках выполнения задания № 3.1.23 «Разработка научно обоснованных методов исследования механизмов теплопередачи в системе «Человек

Защитная одежда – Внешняя среда» (ГР № 20180624) подпрограммы «Научное обеспечение безопасности человека, общества и государства» Государственной программы научных исследований «Информатика, космос и безопасность».



¹ Специальное программное обеспечение для анализа и прогнозирования состояния теплового комфорта пожарных и спасателей «ТОРС»: свид. № 1331 (НЦИС) / А.Н. Чорный, Н.М. Дмитракович, Д.В. Жук. – Оpubл. 14.09.2020.

Рисунок 4. – Схема построения алгоритма работы специального программного обеспечения «ТОРС»

Программное обеспечение позволяет рассчитывать физические показатели системы человек – одежда – внешняя среда в стационарном и нестационарном режимах. Выходные данные представляют собой зависимости физических показателей от времени и величины воздействия. Данные возможности выстраивают перспективу прогнозирования поведения пакета материалов тканей защитной одежды и позволяют улучшать характеристики пакета материалов под конкретные задачи.

Заключение

Исследованы основные уравнения, описывающие перенос тепла, влаги и паров, позволяющие моделировать процесс эксплуатации одежды. Аналитические и численные подходы исследователей позволили разработать расчетные модели тепломассопереноса. Наиболее распространенные и универсальные подходы к моделированию тепломассопереноса в зарубежных изданиях сформулировали *P.W. Gibson, A.H. Woodcock, D.A. Torvi, W.E. Mell, J.R. Lawson*. Разработанные ими модели позволяют рассчитывать перенос тепла, избыточной влаги через текстильные материалы и могут быть применены к конструкции многослойного пакета материалов. Однако зарубежные модели расчетов не объединены в систему метаболизма человека. В этом ключе появляется необходимость разбиения тепловой системы на составляющие для применения законов переноса тепла. Также малоизучен тепломассоперенос при смене фазовых состояний в материалах при нестационарном режиме.

В ходе научных исследований Университета гражданской защиты МЧС Беларуси и Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси удалось выработать систему компартментного подхода для расчета теплового состояния организма человека. Данный подход позволил учесть в модели метаболизм организма человека с одной стороны и тепломассоперенос в текстильных материалах с другой. Полученная система позволяет моделировать тепловое состояние организма в различных условиях и при нестационарном режиме. В целях эффективности проведения расчетов разработанный подход описан математическими уравнениями и изложен в листинге кода специального программного обеспечения «ТОРС»². Предметом дальнейших исследований в совокупности с экспериментом является зависимость распределения температурно-влажностного режима в слоях пакета материалов защитной одежды и в среде пододежного пространства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gibson, P.W. Governing equations for multiphase heat and mass transfer in hygroscopic porous media with applications to clothing materials / P.W. Gibson // Technical report Natick. – USA, 1994. – 60 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/216777883_Multiphase_Heat_and_Mass_Transfer_Through_Hygroscopic_Porous_Media_with_Applications_to_Clothing_MaterialsFinal_Report_Jan_1994-Mar_1996.
2. Woodcock, A.H. Moisture Transfer in Textile Systems, Part I / A.H. Woodcock // Textile Research Journal. – 1962. – Vol. 1, Iss. 32. – P. 628–633. DOI: 10.1177/004051756203200802.
3. Wu, Y.S. Measuring the thermal insulation and evaporative resistance of sleeping bags using a supine sweating fabric manikin / Y.S. Wu, Jintu Fan // Measurement Science and Technology. – 2009. – Vol. 20, No. 9. – P. 95–108. DOI: 10.1088/0957-0233/20/9/095108.
4. Song, G. Modeling thermal protection outfits for fire exposures: Ph.D. thesis / G. Song. – Raleigh, 2004. – 209 p. URI: <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/5766>.
5. Torvi, D.A. Heat transfer in thin fibrous material under high heat flux conditions: Ph.D. thesis / D.A. Torvi. – Edmonton, 1997. – 277 p. DOI: 10.7939/R3M03Z33Z.
6. Mandal, S. Characterization of textile fabrics under various thermal exposures / S. Mandal, G. Song, M. Ackerman, S. Paskaluk, F. Gholamreza // Textile Research Journal. – 2013. – Vol. 83, No. 10. – P. 1005–1019. DOI: 10.1177/0040517512461707.

² См. сноску 1.

7. Mell, W.E. A Heat Transfer Model for Firefighters Protective Clothing / W.E. Mell, J.R. Lawson // *Fire Technology*. – 1999. – Vol. 36, No. 1. – P. 39–68. DOI: 10.1023/A:1015429820426.
8. Lee, Y.M. Effect of Moisture on the Thermal Protective Performance of Heat-Resistant Fabrics / Y.M. Lee, R.L. Barker // *Journal of Fire Sciences*. – 1986. – Vol. 4, No. 5. – P. 315–331. DOI: 10.1177/073490418600400502.
9. Ghazy, A. Numerical Simulation of Heat Transfer in Firefighters' Protective Clothing with Multiple Air Gaps during Flash Fire Exposure / A. Ghazy, D.J. Bergstrom // *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. – 2012. – Vol. 61, Iss. 8. – P. 569–593. DOI: 10.1080/10407782.2012.666932.
10. Ogniewicz, Y. Analysis of condensation in porous insulation / Y. Ogniewicz, C.L. Tien // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1981. – Vol. 24, No. 3. – P. 421–429. DOI: 10.1016/0017-9310(81)90049-1.
11. Farnworth, B. A Numerical Model of the Combined Diffusion of Heat and Water Vapor Through Clothing / B. Farnworth // *Textile Research Journal*. – 1986. – Vol. 56, No. 11. – P. 653–665. DOI: 10.1177/004051758605601101.
12. Li, Y. Mathematical simulation of heat and moisture transfer in a human – clothing – environment system / Y. Li, B. Holcombe // *Textile Research Journal*. – 1998. – Vol. 68, No. 6. – P. 389–397. DOI: 10.1177/004051759806800601.
13. Gagge, A.P. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response / A.P. Gagge, J.A.J. Stolwijk, Y. Nishi // *Memoirs of the Faculty of Engineering*. – 1971. – P. 21–36. URI: <http://hdl.handle.net/2115/37901>.
14. Fan, J. Measurement of clothing thermal insulation and moisture vapour resistance using a novel perspiring fabric thermal manikin / Jintu Fan, Y.S. Chen // *Measurement Science and Technology*. – 2002. – Vol. 13, No. 7. – P. 1115–1123. DOI: 10.1088/0957-0233/13/7/320.
15. Gibson, P.W. Coupled Heat and Mass Transfer Through Hygroscopic Porous Materials-Application to Clothing Layers / P.W. Gibson, M. Charmchi // *University of Massachusetts Lowell*. – 1997. – Vol. 53, No. 5. – P. 183–194. DOI: 10.2115/fiber.53.5_183.
16. Torvi, D.A. Effects of variations in thermal properties on the performance of flame resistant fabrics for flash fires / D.A. Torvi, J.D. Dale // *Textile Research Journal*. – 1998. – Vol. 68, Iss. 11. – P. 787–796. DOI: 10.1177/004051759806801102.
17. Torvi, D.A. Heat Transfer Model of Flame Resistant Fabrics During Cooling After Exposure to Fire / D.A. Torvi, P. Eng, T.G. Threlfall // *Fire Technology*. – 2006. – Vol. 42, Iss. 1. – P. 27–48. DOI: 10.1007/S10694-005-3733-8.
18. Parsons, K.C. Human Thermal Environments: the Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance / K.C. Parsons. – London: Taylor & Francis, 2003. – 560 p.
19. Черунова, И.В. Теоретические основы комплексного проектирования специальной теплозащитной одежды: автореф. дис ... д-ра техн. наук: 05.19.04 / И.В. Черунова. – Шахты, 2008. – 41 с.
20. Pennes, H.H. Analysis of tissue and arterial blood temperature in the resting human forearm / H.H. Pennes // *Journal of Applied Physiology* – 1948. – Vol. 1, No. 2. – P. 93–122. DOI: 10.1152/jappl.1948.1.2.93.
21. Fanger, P.O. Calculation of thermal comfort: Introduction of a basic equation / P.O. Fanger // *ASHRAE Transactions*. – 1967. – Vol. 73. – P. 4.1–4.16.
22. Machle, W. Heat: Man's exchange and physiological responses / W. Mache, T.F. Hatch // *Physiological Reviews*. – 1947. – Vol. 27. – P. 200–227. DOI: 10.1152/PHYSREV.1947.27.2.200.
23. Wissler, E.H. Steady-state temperature distribution in man / E.H. Wissler // *Journal of Applied Physiology*. – 1961. – Vol. 16. – P. 734–740. DOI: 10.1152/JAPPL.1961.16.4.734.
24. Gordon, R.G. A mathematical model of the human temperature regulatory system – transient cold exposure response / R.G. Gordon, R.B. Roemer, S.M. Horvarth // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. – 1976. – Vol. 23, No. 6. – P. 434–444. DOI: 10.1109/TBME.1976.324601.
25. Дмитракович, Н.М. Основы проектирования и обеспечение качества специальной защитной одежды пожарных / Н.М. Дмитракович // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2018. – Т. 2, № 3. – С. 367–375. DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-3.367.
26. Жук, Д.В. Разработка методики испытаний пакетов материалов одежды специальной защитной пожарной с учетом послойного контроля температуры при нагревании / Д.В. Жук, Н.М. Дмитракович // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2020. – Т. 4, № 2. – С. 176–185. DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.176.

Аналитический обзор моделей тепломассопереноса в защитной одежде
Analytical review of heat and mass transfer models in protective clothing

Дмитракович Николай Михайлович

кандидат технических наук

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», кафедра пожарной
аварийно-спасательной техники, профессор

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: ontrnic@mail.ru

ORCID: 0000-0002-5372-1077

Nikolay M. Dmitrakovich

PhD in Technical Sciences

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Chair of Fire Rescue Equipment, Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: ontrnic@mail.ru

ORCID: 0000-0002-5372-1077

Жук Дмитрий Викторович

Государственное учреждение образования
«Университет гражданской защиты
Министерства по чрезвычайным ситуациям
Республики Беларусь», факультет подготовки
научных кадров, начальник лаборатории

Адрес: ул. Машиностроителей, 25,
220118, г. Минск, Беларусь

e-mail: z.d.vic@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-8244-3291

Dmitry V. Zhuk

State Educational Establishment «University
of Civil Protection of the Ministry for Emergency
Situations of the Republic of Belarus»,
Faculty of Postgraduate Scientific,
Head of Laboratory

Address: Mashinostroiteley str., 25,
220118, Minsk, Belarus

e-mail: z.d.vic@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-8244-3291

DOI: <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2021.5-3.352>

ANALYTICAL REVIEW OF HEAT AND MASS TRANSFER MODELS IN PROTECTIVE CLOTHING

Dmitrakovich N.M., Zhuk D.V.

Purpose. Review the models for determining the thermophysical and physiological indicators of the state of a person in protective clothing by modeling heat and mass transfer systems.

Methods. Analysis of approaches to the determination of heat and mass transfer in protective clothing by reviewing scientific works in the area under study.

Findings. The analysis of methods for determining the thermophysical and physiological indicators of the state of a person in protective clothing by modeling heat and mass transfer systems is carried out, the necessary conditions for obtaining test data and comparison with calculation data are determined.

Application field of research. The results of the research can be used in the development, research and optimization of methods for determining the thermophysical and physiological indicators of the human condition in protective clothing of firefighters by modeling heat and mass transfer systems.

Keywords: special protective clothing for firefighters, metabolism, thermal conductivity coefficient, heat flow, heat and mass transfer.

(The date of submitting: January 18, 2021)

REFERENCES

1. Gibson P.W. *Governing equations for multiphase heat and mass transfer in hygroscopic porous media with applications to clothing materials*: Technical report Natick. USA. 1994. 60 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/216777883_Multiphase_Heat_and_Mass_Transfer_Through_Hygroscopic_Porous_Media_with_Applications_to_Clothing_MaterialsFinal_Report_Jan_1994-_Mar_1996.
2. Woodcock A.H. Moisture Transfer in Textile Systems, Part I. *Textile Research Journal*, 1962. Vol. 1, Iss. 32. Pp. 628–633. DOI: 10.1177/004051756203200802.
3. Wu Y.S., Fan J. Measuring the thermal insulation and evaporative resistance of sleeping bags using a supine sweating fabric manikin, *Measurement Science and Technology*, 2009. Vol. 20, No. 9. Pp. 95–108. DOI: 10.1088/0957-0233/20/9/095108.
4. Song G. *Modeling thermal protection outfits for fire exposures: Ph.D. thesis*. Raleigh, 2004. 209 p. URI: <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.16/5766>.
5. Torvi D. A. *Heat transfer in thin fibrous material under high heat flux conditions: Ph.D. thesis*. Edmonton, 1997. 277 p. DOI: 10.7939/R3M03Z33Z.
6. Mandal S., Song G., Ackerman M., Paskaluk S., Gholamreza F. Characterization of textile fabrics under various thermal exposures. *Textile Research Journal*, 2013. Vol. 83, No. 10. Pp. 1005–1019. DOI: 10.1177/0040517512461707.
7. Mell W.E., Lawson J.R. A Heat Transfer Model for Firefighters Protective Clothing. *Fire Technology*, 1999. Vol. 36, No. 1. Pp. 39–68. DOI: 10.1023/A:1015429820426.
8. Lee Y.M., Barker R.L. Effect of Moisture on the Thermal Protective Performance of Heat-Resistant Fabrics. *Journal of Fire Sciences*, 1986. Vol. 4, No. 5. Pp. 315–331. DOI: 10.1177/073490418600400502.
9. Ghazy A., Bergstrom D.J. Numerical Simulation of Heat Transfer in Firefighters' Protective Clothing with Multiple Air Gaps during Flash Fire Exposure. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2012. Vol. 61, Iss. 8., Pp. 569–593. DOI: 10.1080/10407782.2012.666932.
10. Ogniewicz Y., Tien C.L. Analysis of condensation in porous insulation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1981. Vol. 24, No. 3. Pp. 421–429. DOI: 10.1016/0017-9310(81)90049-1.
11. Farnworth B. A Numerical Model of the Combined Diffusion of Heat and Water Vapor Through Clothing. *Textile Research Journal*, 1986. Vol. 56, No. 11. Pp. 653–665. DOI: 10.1177/004051758605601101.
12. Li Y., Holcombe B. Mathematical simulation of heat and moisture transfer in a human–clothing–environment system. *Textile Research Journal*, 1998. Vol. 68, No. 6. Pp. 389–397. DOI: 10.1177/004051759806800601.

13. Gagge A.P., Stolwijk J.A. J., Nishi Y. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *Memoirs of the Faculty of Engineering*, 1971. Pp. 21–36. URI: <http://hdl.handle.net/2115/37901>.
14. Fan J., Chen Y.S. Measurement of clothing thermal insulation and moisture vapour resistance using a novel perspiring fabric thermal manikin. *Measurement Science and Technology*, 2002. Vol. 13, No. 7. Pp. 1115–1123. DOI: 10.1088/0957-0233/13/7/320.
15. Gibson P.W., Charmchi M. Coupled Heat and Mass Transfer Through Hygroscopic Porous Materials- Application to Clothing Layers. *University of Massachusetts Lowell*, 1997. Vol. 53, No. 5. Pp. 183–194. DOI: 10.2115/fiber.53.5_183.
16. Torvi D.A., Dale J.D. Effects of variations in thermal properties on the performance of flame resistant fabrics for flash fires. *Textile Research Journal*, 1998. Vol. 68, Iss. 11. Pp. 787–796. DOI: 10.1177/004051759806801102.
17. Torvi D.A., Eng P., Threlfall T.G. Heat Transfer Model of Flame Resistant Fabrics During Cooling After Exposure to Fire. *Fire Technology*, 2006. Vol. 42, Iss. 1. Pp. 27–48. DOI: 10.1007/S10694-005-3733-8.
18. Parsons K.C. *Human Thermal Environments: the Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance*. London: Taylor & Francis. 2003. 560 p.
19. Cherunova I. V. Teoreticheskie osnovy kompleksnogo proektirovaniya spetsial'noy teplozashchitnoy odezhdy [Theoretical bases of complex design of special heat-protective clothing]: PhD tech. sci. diss. Synopsis: 05.19.04, Shakhty, 2008. 41 p. (rus)
20. Pennes H.H. Analysis of tissue and arterial blood temperature in the resting human forearm. *Journal of Applied Physiology*, 1948. Vol. 1, No. 2. Pp. 93–122. DOI: 10.1152/jappl.1948.1.2.93.
21. Fanger P.O. Calculation of thermal comfort: Introduction of a basic equation. *ASHRAE Transactions*, 1967. Vol. 73. Pp. 4.1–4.16.
22. Machle W, Hatch T.F. Heat: Man's exchange and physiological responses. *Physiological Reviews*. 1947. Vol. 27. Pp. 200–227. DOI: 10.1152/PHYSREV.1947.27.2.200.
23. Wissler E.H. Steady-state temperature distribution in man. *Journal of Applied Physiology*. 1961. Vol. 16. Pp. 734–740. DOI: 10.1152/JAPPL.1961.16.4.734.
24. Gordon R.G., Roemer R.B., Horvarth S.M. A mathematical model of the human temperature regulatory system – transient cold exposure response. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1976. Vol. 23, No. 6. Pp. 434–444. DOI: 10.1109/TBME.1976.324601.
25. Dmitrakovich N.M. Osnovy proektirovaniya i obespechenie kachestva spetsial'noy zashchitnoy odezhdy pozharnykh [Fundamentals of design and quality assurance of special protective clothing for firefighters]. *Journal of Civil Protection*, 2018. Vol. 2, No. 3. Pp. 367–375. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2018.2-3.367.
26. Zhuk D.V., Dmitrakovich N.M. Razrabotka metodiki ispytaniy paketov materialov odezhdy spetsial'noy zashchitnoy pozharnykh s uchetom posloynogo kontrolya temperatury pri nagrevanii [Development of a methodology for testing packages of materials for special protective clothing for firefighters, taking into account layer-by-layer temperature control during heating]. *Journal of Civil Protection*, 2020. Vol. 4, No. 2. Pp. 176–185. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2020.4-2.176.