DOI: 10.17117/na.2015.12.02.260

<http://ucom.ru/doc/na.2015.12.02.260.pdf>

Поступила (Received): 24.12.2015

**Селина Н.Г., Кораблина С.Ю., Осина Т.М.,
Афанасьева Р.М., Прохоров В.Т**
**Оценка обоснованности выбора пакетов материалов
по формированию комфортных условий
военнослужащим Арктики (сообщение 4)**

**Selina N.G., Korablina S.Yu., Osina T.M.,
Afanasyeva R.M., Prokhorov V.T.**
**Assessment of the validity of the choice of materials for
the formation of a package of comfortable
conditions servicemen Arctic (4 message)**

В сообщениях проведены исследования по созданию костюма и обуви для защиты от холода военнослужащего, находящегося в условиях Арктики. В основу создания теплозащитной одежды для эксплуатации в условиях Арктики должен быть положен научный принцип, учитывающий физиологию теплообмена человека с окружающей средой. При разработке теплозащитной одежды следует выполнять требования к теплоизоляции всех областей тела. С увеличением толщины пакета материалов утепляющей одежды повышается практически только температура кожи тех областей тела, которые защищены (туловище, плечо, бедро)

Ключевые слова: костюм, обувь, военнослужащий, в условиях Арктики, холод, холодовой стресс, охлаждение, теплозащитная одежда

Селина Надежда Геннадьевна
Аспирант
Институт сферы обслуживания и
предпринимательства (филиал)
г. Шахты-500, ул. Шевченко, 147

Кораблина Светлана Юрьевна
Доцент
Федеральное бюро медико-социальной экспертизы
г. Москва, ул. Ивана Сусанина, 3

In the messages researches on creation of a suit for protection against cold of the serviceman who is in conditions of the Arctic are conducted. The scientific principle considering physiology of heat exchange of the person with environment has to be the basis for creation of heat-shielding clothes for operation in the conditions of the Arctic. When developing heat-shielding clothes it is necessary to fulfill requirements to thermal insulation of all areas of a body. With increase in thickness of a package of materials of the warming clothes practically only temperature of skin of those areas of a body, which zakshchishchena increases (a trunk, a shoulder, a hip)

Key words: a suit, the serviceman, shoes, in the conditions of the Arctic, cold, holodovaya stress, cooling, heat-shielding clothes

Selina Nadezhda Gennadevna
Graduate
Institute of the service sector and enterprise
(branch)
Shakhty-500, Shevchenko st., 147

Korablina Svetlana Yurevna
Associate Professor
Federal bureau of medical and social expertise
Moscow, Ivan Susanin st., 3

Осина Татьяна Матвеевна

Кандидат технических наук, доцент
Институт сферы обслуживания и
предпринимательства (филиал)
г. Шахты-500, ул. Шевченко, 147

Osina Tatiana Matveevna

Candidate of Engineering Sciences, Associate
Professor
Institute of the service sector and enterprise
(branch)
Shakhty-500, Shevchenko st., 147

Афанасьева Ралема Федоровна

Доктор медицинских наук, профессор, главный
научный сотрудник
Института сферы обслуживания и
предпринимательства (филиал)
г. Шахты-500, ул. Шевченко, 147

Afanasyeva Ralema Federovna

Doctor of Medical Sciences, Professor, chief scientific
officer
Institute of the service sector and enterprise
(branch)
Shakhty-500, Shevchenko st., 147

Прохоров Владимир Тимофеевич

Доктор технических наук, профессор
Институт сферы обслуживания и
предпринимательства (филиал)
г. Шахты-500, ул. Шевченко, 147

Prohorov Vladimir Timofeevich

Doctor of Engineering Sciences, Professor
Institute of the service sector and enterprise
(branch)
Shakhty-500, Shevchenko st., 147

Определение основных требований к костюму для человека, находящегося в зонах с повышенной температурой, является и сегодня самой сложной и востребованной проблемой.

Отдельно от задач инженерного проектирования костюма осуществляется математическое моделирование системы «человек-костюм-окружающая среда», которое нацелено на исследование состояния человека в рамках поставленных условий моделирования. В системах автоматизированного проектировании одежды инженером-конструктором задаются коэффициенты на основании своего опыта и интуиции, а также общепринятых расчётов, базирующихся на математических моделях.

Разработка математических моделей системы «человек-костюм-окружающая среда», позволяющих создать алгоритмы расчета исходных параметров для средств индивидуальной защиты человека, является актуальной и прямой задачей математического моделирования в рамках разработки средств индивидуальной защиты человека, находящегося в климатических зонах с повышенной температурой [1].

Аппроксимирующие человеческое тело фигуры рассматриваются, как системы с распределенными или сосредоточенными параметрами. При аппроксимации тела одним цилиндром можно говорить, только о приближенном воспроизведении теплового режима человека. Грубое приближение обеспечивается моделями, в которых теплопроводность, теплопродукция и теплопотери тканей тела, принимаются постоянными по всей толщине цилиндра или слоя. Большинство авторов не учитывают систему физиологической терморегуляции человека. Они рассматривают человека в комфортных условиях, когда механизмы терморегуляции бездействуют. В наших исследованиях учитывается система терморегуляции. Кровоток в тканях, метаболическая теплопродукция и теплопотери испарением, рассматриваются как функции средней температуры тела; температуры мозга и средней температуры кожи; температуры мозга, кожи и теплового потока с поверхности кожи.

Анализ существующих математических моделей теплового состояния человека в условиях влияния параметров окружающей среды позволяет предположительно определить форму элементов человеческого тела, которое можно разделить на следующие участки: голова – шар; руки, ноги – цилиндры; туловище – набор эллиптических цилиндров – это в грубом приближении.

Таким образом, человека можно представить в виде совокупности геометрических фигур, изображенных на рис. 1а.

Рис 1. Геометрический образ: а- тела человека, б – стопы человека

В основу концепции математического формирования стопы положено представление её для обуви как совокупности многослойных пакетов материалов различной формы и состава. С помощью программы 3D Studio MAX 5 построили геометрический образ стопы человека (рис. 1б).

Основными факторами, влияющими на температуру внутрикостюмного пространства при построении математической модели, являются температура окружающей среды, теплообразование тела человека, теплофизические свойства материалов, составляющих пакеты, форма этих пакетов и теплоотдача с внешней поверхности комплекта костюма в окружающую среду [2].

Основным критерием комфортного состояния человека принято значение температуры внутрикостюмного пространства в пределах от 21 до 25°C. При этом, при воздействии на человека низких температур, как правило, не учитывается потоотделение человека в силу его малого влияния на процесс теплообмена. При повышенной температуре окружающей среды основная роль в сохранении постоянной температуры тела принадлежит коже, через которую осуществляется теплоотдача путем излучения, проведения и испарения. Когда температура окружающего воздуха совпадает с температурой тела человека,

теплоотдача осуществляется преимущественно за счет потоотделения (испарение 1 л воды ведет к потере тепла, равной 580 кал). Поэтому, при повышенной влажности и высокой температуре воздуха, когда испарение пота затруднено, чаще всего возникает перегрев организма человека. Такие случаи возникают при работе в плотной неветилируемой одежде и, особенно, в защитных противохимических костюмах. В этой связи, очень важно учитывать потоотделение при проектировании костюма, обеспечивающих необходимое время комфортного пребывания в условиях повышенных температур.

К показателям, характеризующим тепловое состояние человека, относятся температура тела, температура поверхности кожи и ее топография, теплоощущения, количество выделяемого пота, состояние сердечно-сосудистой системы и уровень работоспособности.

Температура тела человека характеризует процесс терморегуляции организма. Она зависит от скорости потери теплоты, которая, в свою очередь, зависит от температуры и влажности воздуха, скорости его движения, наличия тепловых излучений и теплозащитных свойств одежды. Выполнение работ категорий Пб и III сопровождается повышением температуры тела на 0,3...0,5 °C. При повышении температуры тела на 1° C начинает ухудшаться самочувствие, появляются вялость, раздражительность, учащаются пульс и дыхание, снижается внимательность, растет вероятность несчастных случаев. При температуре 39°C человек может упасть в обморок.

Температура кожного покрова человека, находящегося в состоянии покоя в комфортных условиях, находится в пределах 32...34 °C. С повышением температуры воздуха она также растет до 35 °C, после чего возникает потоотделение, ограничивающее дальнейшее увеличение температуры кожи, хотя в отдельных случаях (особенно при высокой влажности воздуха) она может достигать 36...37 °C. Установлено, что при разности температур на центральных и периферических участках поверхности тела менее 1,8°C человек ощущает жару; 3...5 °C – комфорт; более 6 °C – холод. При увеличении температуры воздуха также уменьшается разница между температурой кожи на открытых и закрытых участках тела.

Программный продукт написан с помощью прикладных математических пакетов MAPLE и предназначен для расчета распределения температуры и парциального давления в процессе тепло-массообмена в системе «человек – одежда – обувь – окружающая среда» для плоского пакета материалов, в том случае, когда человек находится в климатической среде с повышенной температурой [2,3].

Введем следующие обозначения:

T_c – температура окружающей среды (°C);

U_c – парциальное давление паров влаги в окружающей среде (мм. рт. ст.);

t – время (ч);

x_i – координата i – го слоя пакета (м), $l_{i-1} < x_i < l_i$;

$l_{i-1}; l_i$ – границы i – го слоя пакета;

$\hat{T}_i(x_i; t)$ – температура i – го слоя пакета (°C);

$\hat{U}_i(x_i; t)$ – парциальное давление паров влаги для i – го слоя пакета (мм. рт. ст.);

$T_i(x_i; t) = \hat{T}_i(x_i; t) - T_c$ – относительная температура i – го слоя пакета ($^{\circ}\text{C}$);

$U_i(x_i; t) = \hat{U}_i(x_i; t) - U_c$ – относительное парциальное давление паров влаги для i – го слоя пакета (мм. рт. ст.);

λ_i – коэффициент теплопроводности i – го слоя пакета ($\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$);

d_i – коэффициент паропроницаемости i – го слоя пакета ($\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{мм.рт.ст.})$);

$a_{11}(i)$ – коэффициент температуропроводности i – го слоя пакета ($\text{м}^2/\text{ч}$);

$a_{22}(i)$ – коэффициент диффузии паров i – го слоя пакета ($\text{м}^2/\text{ч}$);

$a_{12}(i)$ – коэффициент диффузной теплопроводности i – го слоя пакета ($\text{м}^2/\text{ч}$);

$a_{21}(i)$ – коэффициент термодиффузии паров i – го слоя пакета ($\text{м}^2/\text{ч}$);

$q(t)$ – плотность теплового потока стопы ($\text{Вт}/\text{м}^2$);

$M(t)$ – плотность потока массы влаги, выделяемой телом человека ($\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$);

α – коэффициент теплоотдачи ($\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$);

β – коэффициент массоотдачи ($\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{мм.рт.ст.})$);

Система уравнений для описания процесса тепломассопереноса в системе «человек – одежда – обувь – окружающая среда» имеет следующий вид

$$\begin{cases} \frac{\partial T_i}{\partial t} = a_{11}(i) \frac{\partial^2 T_i}{\partial x_i^2} + a_{12}(i) \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i^2}; \\ \frac{\partial U_i}{\partial t} = a_{21}(i) \frac{\partial^2 T_i}{\partial x_i^2} + a_{22}(i) \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i^2}, \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

Рассматриваются следующие граничные условия .

Тепловой поток тела человека, поступающий на внутреннюю поверхность костюма, равен $q(t)$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x_1}(0, t) + q(t) = 0; \quad (2)$$

Плотность потока массы влаги, выделяемой телом человека, равен $M(t)$

$$d_1 \frac{\partial U_1}{\partial x_1}(0, t) + M(t) = 0; \quad (3)$$

Теплообмен на поверхности костюма происходит по закону Ньютона

$$\lambda_n \frac{\partial T_n}{\partial x_n}(l_n, t) + \alpha T_n(l_n, t) = 0; \quad (4)$$

Подошва костюма водонепроницаема, что выражается на ее внутренней поверхности равенством:

$$\frac{\partial U_n}{\partial x_n}(l_{n-1}, t) = 0; \quad (5)$$

между слоями низа обуви предполагается идеальный контакт, который выражается условиями сопряжения на стыках:

$$T_{i-1}(l_{i-1}, t) = T_i(l_{i-1}, t), \quad (6)$$

$$\lambda_{i-1} \frac{\partial T_{i-1}}{\partial x_{i-1}}(l_{i-1}, t) = \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x_i}(l_{i-1}, t), \quad i = 2, \dots, n, \quad (7)$$

$$U_{i-1}(l_{i-1}, t) = U_i(l_{i-1}, t), \quad (8)$$

$$d_{i-1} \frac{\partial U_{i-1}}{\partial x_{i-1}}(l_{i-1}, t) = d_i \frac{\partial U_i}{\partial x_i}(l_{i-1}, t), \quad i = 2, \dots, n-2. \quad (9)$$

Начальные условия:

$$T_i(x_i, 0) = f_i(x_i). \quad (10)$$

$$U_i(x_i, 0) = g_i(x_i) \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (11)$$

В качестве примера рассмотрим теоретический расчет тепломассообмена через подошву обуви при повышенной температуре внешней среды, равной 40°C. Характеристика пакета материалов низа обуви приведена в таблице 1.

Таблица 1. Состав низа обуви

№ слоя	Материал слоя	Толщина слоя (мм)
1	Хлопчатобумажный носок	2
2	стелька	5
3	картон	1,8
4	подошва	10

Плотность теплового потока стопы – 10 Вт/м², плотность потока массы влаги, выделяемой стопой – 0,02 ((кг/(м²·ч)). Результаты расчетов изменения температуры и парциального давления паров внутриобувного пространства приведены на рисунках 2 и 3, на которых кривая 1 – для пакетов материалов для низа обуви использовали в качестве подошвы непористую водонепроницаемую резину; а кривая 2 – для пакета материалов для низа обуви, когда в качестве подошвы использовали материал, изготовленный по нанотехнологии и обладающий способностью к вентиляции, т.е. к обмену воздуха в внутриобувном пространстве.

Таким образом, разработка программного продукта для формирования комфортных условий человеку при его нахождении в климатической среде с повышенной температурой впервые позволит осуществлять обоснованный выбор пакета материалов для костюма, чтобы реализовывать эти самые условия комфортности и существенно улучшать условия труда человеку в экстремальных условиях.

Если программное обеспечение для обоснования выбора пакетов материалов для одежды и обуви при формировании комфортных условий для человека, находящегося в климатических зонах с пониженной температурой, обусловлено контролем за снижением температуры внутрикостюмного пространства до 21 С⁰ для стопы и до 31 С⁰ для тела человека, которые были заложены в

разработанное программное обеспечение при обоснованном выборе пакета материалов с учетом теплофизических характеристик, то при разработке программного обеспечения по обоснованному выбору пакетов материалов для человека, находящегося в климатических зонах с повышенной температурой, задача решалась иначе, а именно исходя из необходимости контроля за недопущением повышения температуры тела человека.

Рис. 2. Характеристика внутриобувного пространства:
а- температуры; б – парциального давления паров

Это обусловлено тем, что повышение на 0,3-0,5 С уже формирует человеку дискомфорт, а при повышении свыше 1 С, это исключает его нахождения в этих условиях. Следовательно пакеты материалов и костюм из них должны гарантировать человеку выполнение этих требований в течении всего времени нахождения его в этих условиях.

Разработанное авторами программное обеспечение решает эту задачу и создает предпосылки для обоснованного выбора пакета материалов на основе полученных теплофизических характеристик на стендах и приборах, изложенных в сообщении 2. следовательно наличие современных средств для определения теплофизических характеристик и пакетов материалов и разработанное программное обеспечение гарантирует производителям с высокой степенью достоверностью изготавливать костюм, который формирует комфортные условия, в течении всего времени исполнения ими служебных обязанностей. Весь перечень работ, предложенных читателю не должен его вводить в заблуждение, что отпала необходимость в опытной носке. Конечно нет. Опытная носка в реальных условиях подтверждает правомочность сделанных выводов или их отвергает. Но наличие высокоэффективных методов исследования теплофизических свойств материалов и программного обеспечения по обоснованному выбору пакетов материалов существенно снижает затраты на разработку и производству спецодежды для рабочих военнослужащих и для условий с пониженной температурой и для условий с пониженной температурой. Но что еще очень важно, формирование требований к материалам по возможности их использо-

вания для производства спецодежды востребованы и разработчиками самих материалов, в том числе и с использованием нанотехнологии и это все в совокупности решит задачу по защите военнослужащих от воздействия внешних отрицательных условий.

Список используемых источников:

1. Осина Т.М., Михайлов А.Б., Михайлова И.Д. и др. Особенности математического моделирования нестационарного процесса теплообмена в системе «стопа-обувь-окружающая среда» // Дизайн и технологии. 2009. №11(53). С. 91–98.
2. Прохоров В.Т., Михайлова И.Д., Осина Т.М. и др. Оценка эффективности создания комфортных условий человеку в климатических зонах с пониженной температурой // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2010. №2.
3. Михайлов А.Б. Программное обеспечение для расчета задачи теплообмена системы «Стопа – обувь – окружающая среда»: свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2006611288/ Зарегистрировано 17.04.2006. Регистрация в реестре программ для ЭВМ. Заявка № 2006610548 (26.02.06).
4. Программное обеспечение для решения задачи нестационарных процессов теплообмена для системы «Стопа – обувь – окружающая среда» при условии зависимости коэффициентов теплопроводности от температуры: свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2008610087/ Михайлов А.Б. Зарегистрировано 09.01.2008. Регистрация в реестре программ для ЭВМ. Заявка № 2007614069 (17.10.07).
5. Осина Т.М. Программное обеспечение решение задачи оценки комфортного пребывания человека в обуви в зависимости от изменения теплового потока стоп во времени: свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ №2009613371. Зарегистрировано 26.06.2009. Регистрация в реестре программ для ЭВМ. Заявка № 2009611957 (29.04.09).
6. Михайлова И.Д. Программный продукт для расчета температурного поля нестационарного процесса теплообмена в системе «Стопа – обувь – окружающая среда» при воздействии на стопу низких температур: свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ №2011611394. Зарегистрировано 11.02.2011. Регистрация в реестре программ для ЭВМ. Заявка № 2010618020 (20.12.10).
7. Осина Т.М. Программное обеспечение по описанию локального нестационарного теплообмена в системе «Стопа-обувь-окружающая среда» для различных климатических зон: свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ №2011619212. Зарегистрировано 30.11.2011. Регистрация в реестре программ для ЭВМ. Заявка № 2011617565 (12.10.11).
8. Афанасьева Р.Ф., Тихонова Н.В., Михайлов А.Б., Осина Т.М., Михайлова И.Д., Прохоров В.Т. Полимерные материалы в производстве костюма для военнослужащих Арктики (сообщение 1) // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 15. С. 155-158.
9. Афанасьева Р.Ф., Тихонова Н.В., Михайлов А.Б., Осина Т.М., Михайлова И.Д., Прохоров В.Т. Полимерные материалы в производстве костюма для военнослужащих Арктики (сообщение 2) // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 15. С. 167-171.