

МЕТОД ОЦЕНКИ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ОДЕЖДЫ И ИХ ПАКЕТОВ

METHOD FOR EVALUATION OF HEAT-SHIELDING PROPERTIES OF CLOTHING MATERIALS AND THEIR PACKAGES

А.С. Соколова*, А.А. Кузнецов, Н.Л. Надежная
Витебский государственный технологический университет

УДК 687.03:677.017

A.S. Sokolova*, A.A. Kuznetsov, N.L. Nadyozhnaya
Vitebsk State Technological University

РЕФЕРАТ

*КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ, ТЕПЛО-
ВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ, ПАКЕТЫ МАТЕРИАЛОВ ОДЕ-
ЖДЫ, ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА, АВТОМАТИЗИ-
РОВАННАЯ СИСТЕМА*

*Цель исследований – разработка метода и ав-
томатизированной установки для определения
показателей теплозащитных свойств материа-
лов одежды.*

*Объектами исследований являлись материалы,
используемые для изготовления боевой одежды
пожарных, и их пакеты.*

*Разработанная универсальная измеритель-
ная установка для определения теплозащитных
свойств материалов одежды и их пакетов позво-
ляет воспроизводить температуру пододежного
пространства и параметры окружающей среды в
широких пределах, что дает возможность прово-
дить испытания материалов в условиях, прибли-
женных к реальным условиям их эксплуатации.*

*Методика определения показателей теплоза-
щитных свойств основана на зависимостях, опи-
сывающих процессы, протекающие в узлах уста-
новки и исследуемом материале при проведении
испытаний.*

*В результате проведенных экспериментальных
исследований установлено, что отклонения значе-
ний коэффициента теплопроводности и теплово-
го сопротивления, определенных по предложенной
методике, от значений, полученных с использова-
нием стандартных методик, не превышают 6 %.*

ABSTRACT

*COEFFICIENT OF THERMAL CONDUCTIVITY, THER-
MAL RESISTANCE, PACKAGES OF CLOTHING MATERI-
ALS, HEAT-SHIELDING PROPERTIES, AUTOMATED SYS-
TEM*

*The method for measuring the parameters of
heat-shielding properties of clothing materials and
their packages and automated plant are developed.*

*The research materials and their packages are used
for the manufacturing of fire fighting garments.*

*The methodology for determining the thermal con-
ductivity and thermal resistance of clothing materi-
als and their packages on the method of stationary heat
mode is developed. The formulas for measuring these
parameters are based on the relations describing the
processes in the parts of the plant and the material
studied in the tests.*

*The automated system for measuring the
heat-shielding properties of clothing materials and
their packages allows testing materials in climatic
conditions as close as possible to the real conditions
of their operation.*

*Analysis of research results allows to determine
that the deviation of the coefficient of thermal conduc-
tivity and thermal resistance values of the proposed
method does not exceed 6 %.*

Высокие требования, предъявляемые к потребительским свойствам и качеству современной одежды, определяют ее конкурентоспособ-

ность на рынке. Из всего многообразия свойств материалов одежды одними из наиболее важных являются теплозащитные свойства, которые

* E-mail: sokolova203509@gmail.com (A.S. Sokolova)

характеризуют способность материалов одежды защищать тело человека от тепловых потерь и перегрева при различных температурных режимах. Наибольшее значение оценка показателей теплозащитных свойств имеет при проектировании демисезонной и зимней одежды, а также одежды специального назначения.

О теплозащитных свойствах материалов судят по тепловому сопротивлению R , коэффициенту теплопроводности λ , и коэффициенту температуропроводности α . Нормативная методика оценки показателей теплозащитных свойств материалов одежды [1] предусматривает проведение испытаний при интервале перепада температур 45–55 °С по методу регулярного теплового режима. Испытания могут проводиться как в условиях естественной, так и вынужденной (скорость воздушного потока 5 м/с) конвекции.

В настоящее время в литературных и патентных источниках [2 – 7] можно встретить описание большого количества методов и приборов для определения показателей теплозащитных свойств материалов. Существующие методы и средства оценки теплозащитных свойств материалов одежды, несмотря на разнообразие, обладают рядом недостатков: они позволяют определять показатели теплозащитных свойств только в ограниченных условиях испытаний, зачастую не соответствующих реальным условиям эксплуатации материалов. Кроме того, существующие технические средства оценки теплозащитных свойств довольно часто характеризуются большими габаритами, высоким энергопотреблением и устаревшей элементной базой.

В связи с этим актуальной задачей является разработка метода определения показателей теплозащитных свойств материалов одежды и их пакетов и его реализация в виде автоматизированной установки на базе современных технических средств, позволяющей проводить испытания как в условиях естественной конвекции, так и вынужденной.

В результате проведенного анализа климатических условий Республики Беларусь установлено, что эксплуатация бытовой одежды производится в среднем диапазоне температур: весной—осенью +5...+15 °С, летом +14...+23 °С, зимой -7,5...+5 °С при среднегодовой скорости ветра 3...4 м/с. Исходя из этого сформулированы

требования, предъявляемые к разрабатываемой автоматизированной системе:

1. Воспроизводимые показатели:

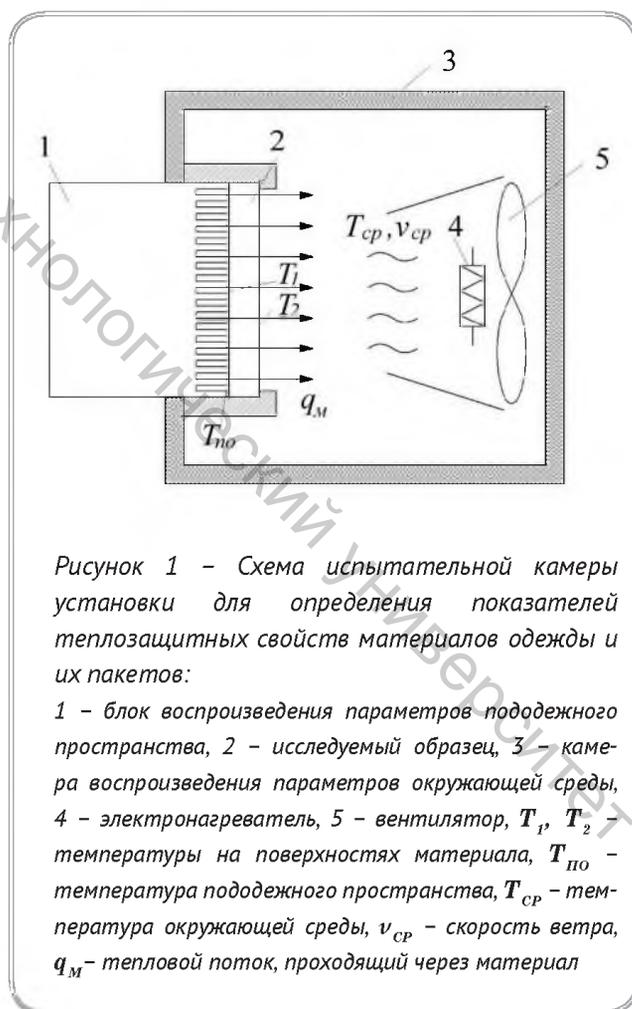
- температура окружающей среды -20...+40 °С;
- температура пододежного пространства 0...40 °С;
- скорость ветра 0...7 м/с.

2. Определяемые показатели:

- коэффициент теплопроводности;
- тепловое сопротивление;
- коэффициент воздухопроницаемости.

В основу методики определения теплового сопротивления и коэффициента теплопроводности положен метод стационарного теплового режима.

Схема испытательной камеры разработанной установки для определения показателей теплозащитных свойств материалов одежды и их пакетов представлена на рисунке 1.



Структурно разработанную установку можно разделить на две части: первая позволяет имитировать микроклимат пододежного пространства, вторая – воспроизводить климатические параметры окружающей среды.

Воспроизведение температурного режима под одеждой реализовано с помощью термоэлектрических модулей Пельтье совместно с системой водяного охлаждения. Камера, воспроизводящая параметры окружающей среды, позволяет поддерживать как положительные, так и отрицательные температуры воздуха возле исследуемого образца. Для нагрева применяется электронагреватель, который установлен в стабилизирующем патрубке центробежного вентилятора, создающего воздушный поток. Охлаждение воздуха в камере осуществляется при помощи компрессорного холодильного агрегата.

Поддержание заданных скорости воздушного потока температур пододежного пространства и окружающей среды осуществляется в автоматическом режиме. Сбор данных с датчиков осуществляется с использованием специально разработанного программного обеспечения для персонального компьютера.

Такая конструкция дает возможность проводить испытания разнообразных материалов одежды в климатических условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации.

Определение теплового сопротивления и коэффициента теплопроводности осуществляется следующим образом. Исследуемый образец материала, имеющий форму круглого диска площадью 0,01 м², помещают в установку. Термоэлектрические модули Пельтье, электронагреватель и вентилятор подключают к сети и, регулируя подаваемую на них мощность, устанавливают заданный температурный режим и скорость воздушного потока. В случае проведения испытаний в условиях естественной конвекции вентилятор закрывают шторкой. После установления стационарного теплового режима снимают показания датчиков температуры на поверхностях материала T_1 , T_2 и на горячей $T_Г$ и холодной $T_Х$ сторонах термоэлектрических модулей Пельтье.

Тепловое сопротивление материала R_M , К·м²/Вт определяется следующей формулой:

$$R_M = \frac{T_1 - T_2}{q_M}, \quad (1)$$

где T_1 , T_2 – температуры на поверхностях материала, К; q_M – плотность теплового потока, проходящего через материал, Вт/м².

Коэффициент теплопроводности λ_M , Вт/м·К, материала одежды

$$\lambda_M = \frac{\delta_M}{R_M}, \quad (2)$$

где δ_M – толщина исследуемого образца материала, м.

В силу стационарности теплового режима плотность теплового потока, прошедшего через материал q_M , равна плотности теплового потока от элементов Пельтье ко внутренней стороне исследуемого материала $q_{по}$.

Плотность теплового потока, подводимого к материалу, $q_{по}$, Вт/м² определим исходя из анализа процессов, протекающих в узлах блока воспроизведения параметров пододежного пространства при проведении испытаний:

$$q_{по} = \frac{K(nQ_{CI} - Q_{II})}{F}, \quad (3)$$

где K – коэффициент, учитывающий потери тепловой мощности в узлах блока воспроизведения параметров пододежного пространства, определяемый экспериментально; n – количество термоэлектрических модулей Пельтье в установке; Q_{CI} – тепловая мощность, отводимая с холодной стороны одного термоэлектрического модуля, Вт; Q_{II} – мощность теплового потока, характеризующего обратный отток тепла с горячей на холодную сторону термоэлектрического модуля Пельтье, Вт; F – площадь поверхности рассеивания радиатора, к которому крепится исследуемый образец материала, м².

Мощность теплового потока, характеризующего обратный отток тепла с горячей на холодную сторону термоэлектрического модуля Пельтье, определим по формуле

$$Q_{II} = \frac{\lambda_3 F_3 (T_Г - T_Х)}{c}, \quad (4)$$

где λ_3 – коэффициент теплопроводности термопасты, заполняющей зазор между термоэлектрическими модулями Пельтье, Вт/м·К; F_3 – площадь зазора между термоэлектрическими модулями Пельтье, м²; T_r, T_x – температуры на горячем и холодном концах термоэлектрической ветви соответственно, К; k ; c – толщина термоэлектрических модулей Пельтье, м.

Площадь зазора между термоэлектрическими модулями Пельтье определяется по формуле

$$F_3 = 4ab + a^2, \quad (5)$$

где a – ширина зазора, м; b – длина модуля, м.

Уравнение теплового баланса на холодных сторонах термоэлектрического модуля Пельтье [8]:

$$Q_{CI} = 2N \left(\alpha I T_x - \frac{RI^2}{2} - k(T_r - T_x) \right), \quad (6)$$

где N – число пар термоэлектрических ветвей в термоэлектрическом модуле Пельтье; α – термоЭДС материала термоэлектрической ветви, В/К; I – измеренное значение силы тока, проходящего через термоэлектрическую ветвь, А; R – электрическое сопротивление термоэлектрической ветви, Ом; k – полная теплопроводность термоэлектрической ветви, Вт/К.

Параметры термоэлектрической ветви a, R, k определяются исходя из технических характеристик термоэлектрических модулей Пельтье, приводимых производителем. Данные параметры можно получить из системы уравнений, описывающих процессы, происходящие в термоэлектрических модулях в различных режимах работы.

Рассмотрим работу термоэлектрического модуля в режиме, когда ток $I = I_{max}$ и разность температур $\Delta T = T_r - T_x = \theta$. При этом мощность, отводимая с холодной стороны термоэлектрического модуля $Q_{CI} = Q_{max}$. Уравнение (6) примет вид:

$$Q_{max} = 2N \left(\alpha I_{max} T_r - \frac{RI_{max}^2}{2} \right). \quad (7)$$

Рассмотрим работу термоэлектрического мо-

дуля в режиме, когда достигается максимальная разность температур $\Delta T = \Delta T_{max}$ при некоторой фиксированной температуре горячего спая T_r . При этом ток $I = I_{max}$ и мощность, отводимая с холодной стороны термоэлектрического модуля, $Q_{CI} = \theta$. Уравнение (7) примет вид:

$$Q_{CI} = 2N \left(\alpha I_{max} (T_r - \Delta T_{max}) - \frac{RI_{max}^2}{2} - k \Delta T_{max} \right) = \theta. \quad (8)$$

Получим выражение для тока I_{max} . Для этого выразим из уравнения (7) разность температур ΔT , учитывая, что $T_x = T_r - \Delta T$ и $Q_{CI} = \theta$:

$$\Delta T = \frac{I(2\alpha T_r - RI)}{2(I\alpha + k)}. \quad (9)$$

Продифференцируем выражение (10) по току I :

$$\frac{d\Delta T}{dI} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2k\alpha T_r - 2kRI - R\alpha I^2}{(I\alpha + k)^2}. \quad (10)$$

Решив уравнение (11) относительно тока I при $d\Delta T / dI = 0$, получим выражение для I_{max} :

$$I_{max} = \frac{-Rk + \sqrt{2RkT_r\alpha^2 + R^2k^2}}{\alpha R}. \quad (11)$$

Объединим уравнения (8), (9), (11) в систему:

$$\begin{cases} Q_{max} = 2N \left(\alpha I_{max} T_r - \frac{RI_{max}^2}{2} \right) \\ 2N \left(\alpha I_{max} (T_r - \Delta T_{max}) - \frac{RI_{max}^2}{2} - k \Delta T_{max} \right) = \theta \\ I_{max} = \frac{-Rk + \sqrt{2RkT_r\alpha^2 + R^2k^2}}{\alpha R} \end{cases} \quad (12)$$

Таким образом, система уравнений (13) содержит неизвестные параметры термоэлектрической ветви a, R, k и известные из технических характеристик параметры термоэлектрического модуля. Решив данную систему, получим выражения для параметров термоэлектрической ветви:

$$R = \frac{Q_{max} (T_r - \Delta T_{max})}{NI_{max}^2 (T_r + \Delta T_{max})}; \quad (13)$$

$$k = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q_{max}(T_r - \Delta T_{max})}{N \Delta T_{max}(T_r + \Delta T_{max})}; \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{Q_{max}}{N I_{max}(T_r + \Delta T_{max})}. \quad (15)$$

Подставив численные значения, приведенные в технических характеристиках термоэлектрических модулей Пельтье (таблица 1), в выражения (14) – (16), определяем параметры термоэлектрической ветви: $R = 6,075 \cdot 10^{-3}$ Ом, $k = 2,738 \cdot 10^{-3}$ Вт/К, $a = 2,122 \cdot 10^{-4}$ В/К.

С учетом выражений (4), (5) и (7) зависимости для определения теплового сопротивления R_M и коэффициента теплопроводности λ_M примут вид:

$$R_M = \frac{F(T_1 - T_2)}{2nKN \left(aT_x - \frac{RI^2}{2} - k(T_r - T_x) \right) - \frac{\lambda_3 F_3 (T_r - T_x)}{c}}, \quad (16)$$

$$\lambda_M = \frac{2nKN \delta_M \left(aT_x - \frac{RI^2}{2} - k(T_r - T_x) \right) - \frac{\lambda_3 F_3 (T_r - T_x)}{c}}{F(T_1 - T_2)}. \quad (17)$$

С целью практической апробации предложенной методики определения показателей теплозащитных свойств на разработанной автоматизированной установке проведены экспериментальные исследования материалов одежды. Объектами исследований являлись материалы, используемые для изготовления боевой одежды пожарных и их пакеты, характеристики которых представлены в таблице 2. Технические характеристики элементов блока воспроизведения параметров поддождевого пространства, используемые при расчетах, представлены в таблице 1.

В таблице 3 представлены результаты экспериментальных исследований теплозащитных свойств данных материалов. Значения коэффициентов теплопроводности λ_M , полученные с использованием разработанного метода, сравнивались со значениями λ_{CT} , определенными по стандартной для материалов боевой одежды пожарной методике (согласно СТБ 1971–2009) [10].

Анализ полученных результатов позволяет отметить, что погрешность определения значений коэффициента теплопроводности и теплового сопротивления предложенным методом не превышает 6 %.

Таблица 1 – Технические характеристики элементов блока воспроизведения параметров поддождевого пространства

Наименование параметра	Обозначение	Числовое значение
Площадь поверхности рассеивания радиатора, к которому крепится исследуемый образец материала, м ²	F	0,12
Коэффициент теплопроводности термопасты, заполняющей зазор между термоэлектрическими модулями Пельтье, Вт/м·К	λ_3	0,8
Ширина зазора, м	a	0,0005
Количество термоэлектрических модулей Пельтье в установке	n	4
Технические характеристики термоэлектрических модулей Пельтье, используемых в установке (ТВ-127-1,4-1,15 (ICE-71))		
Максимальная разность температур между спаями модуля, достигаемая при некоторой фиксированной температуре горячего спая ($T_r = 300$ К) и при нулевой холодильной мощности ($Q_{Cl} = 0$), К	ΔT_{max}	71
Ток, при котором достигается разность температур ΔT_{max} , А	I_{max}	8
Холодопроизводительность при токе I_{max} и разности температур $\Delta T = 0$, Вт	Q_{max}	80
Толщина термоэлектрических модулей Пельтье, м	c	0,0034
Длина модуля, м	b	0,04
Количество термоэлектрических пар в модуле	N	127

Таблица 2 – Характеристики исследуемых материалов и их пакетов

№	Наименование и характеристики материалов и их пакетов
1	Ткань с огнезащитными свойствами для спецодежды «Леонид»
2	Полотно теплоизоляционное холстопршивное (поверхностная плотность 300 г/м ² , полиэфир 50 %, арселон 50 %)
3	Ватин полушерстяной холстопршивной (поверхностная плотность 235 г/м ²)
4	Пакет №1: - ткань с огнезащитными свойствами для спецодежды «Леонид»; - ткань для спецодежды смесовая с пленочным покрытием «СИСУ»; - нетканое холстопршивное полотно (полушерсть 50 %, арселон 50 %); - ткань подкладочная (100 % полиэфир, поверхностная плотность 80 г/м ²).
5	Пакет №2: - ткань с огнезащитными свойствами для спецодежды «Леонид»; - ткань для спецодежды смесовая с пленочным покрытием «СИСУ»; - ватин полушерстяной холстопршивной (поверхностная плотность 235 г/м ²); - ткань подкладочная (полиэфир 100 %, поверхностная плотность 80 г/м ²).

Таблица 3 – Результаты экспериментальных исследований теплозащитных свойств материалов

№ из таблицы 2	Измеряемые параметры						K	Определяемые показатели				Погрешность, %
	δ_{MP} , м	I, А	T ₁ , К	T ₂ , К	T _X , К	T _T , К		λ_{MP} Вт/м·К	R _{MP} К·м ² /Вт	λ_{CTP} Вт/м·К	R _{CTP} К·м ² /Вт	
1	0,00055	3,28	306,94	295,83	284,74	314,8	0,22	0,0145	0,038	0,0149	0,037	2,72
2	0,00471	3,03	308,1	292,51	283,95	311,7	0,06	0,0211	0,223	0,0201	0,234	5,10
3	0,00537	2,95	308,32	292,79	284,18	311,1	0,06	0,0235	0,228	0,0224	0,240	4,92
4	0,00559	2,79	309,35	290,78	284,28	309,4	0,06	0,0195	0,287	0,0192	0,291	1,60
5	0,00625	2,76	308,65	290,19	284,1	308,7	0,06	0,0217	0,287	0,021	0,298	3,55

ВЫВОДЫ

Разработана автоматизированная система для определения показателей теплозащитных свойств материалов одежды и их пакетов, конструкция которой дает возможность воспроизводить температуру пододежного пространства и параметры окружающей среды в широких пределах, что позволит проводить испытания материалов в условиях, приближенных к реальным условиям их эксплуатации. Поддержание температурного режима под одеждой реализовано с помощью современных техни-

ческих средств. Предложен метод определения показателей теплозащитных свойств материалов одежды: коэффициента теплопроводности и теплового сопротивления. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку методики определения коэффициента воздухопроницаемости материалов одежды и их пакетов с использованием данной автоматизированной системы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 20489–75 (1986), *Материалы для одежды. Метод определения суммарного теплового сопротивления*, Москва, Издательство стандартов, 1986, 11 с.
2. Колесников, П.А. (1965), *Теплозащитные свойства одежды*, Москва, Легкая индустрия, 340 с.
3. Осипова, В.А. (1969), *Экспериментальное исследование процессов теплообмена*, Москва, Энергия, 392 с.
4. Патент JP №3919153, МПК 8G 01N 25/18 (2000), *Устройство для измерения теплопроводности*, Omura Takahiro, Tsuboi Mikinori; заявитель и патентообладатель Nichias Corp.
5. Патент RU № 02167412, МПК G01N 25/18 (2001), *Способ комплексного определения теплофизических свойств материалов*, Жуков Н.П., Майникова Н.Ф., Муромцев Ю.Л., Рогов И.В., Орлов В.В.; заявитель и патентообладатель Тамбовский военный авиационный инженерный институт.
6. Патент RU №02149386 РФ, МПК G01N 25/18 (2000), *Способ определения теплофизических характеристик материалов*, Клебанов М.Г., Фесенко А.И.; заявитель и патентообладатель ТВВАИУ.
7. Патент US №6676287 В1 МПК G01K15/00 (2004), *Способ прямого измерения теплопроводности*, Mathis Nancy, Chandler Christina; заявитель и патентообладатель Mathis Instruments Ltd.
8. Булат, Л.П. и др. (2002), *Термоэлектрическое охлаждение*, Санкт-Петербург, СПбГУНиПТ, 147 с.
9. РД 50-411-83 (1984), *Методические указания. Расход жидкостей и газов. Методика выполнения измерений с помощью специальных сужа-*

REFERENCES

1. GOST 20489-75 (1986), *Materials for clothing. A method of determining the total thermal resistance* [Materialy dlja odezhdy. Metod opredelenija summarnogo teplovogo soprotivlenija], Moscow, 11 p.
2. Kolesnikov, P.A. (1965), *Teplozashhitnye svojstva odezhdy* [Thermal insulation properties of clothing], Moscow, 340 p.
3. Osipova, V.A. (1969), *Jeksperimental'noe issledovanie processov teploobmena* [Experimental investigation of heat transfer processes], Moscow, 392 p.
4. Patent JP No 3919153, MPK 8G 01N 25/18 (2000), *A device for thermal conductivity measurement* [Ustrojstvo dlja izmerenija teploprovodnosti], Omura Takahiro, Tsuboi Mikinori; Assignee Nichias Corp.
5. Patent RU No 02167412, MPK G01N 25/18 (2001), *Method of complex determination of thermophysical properties of materials* [Sposob kompleksnogo opredelenija teplofizicheskikh svojstv materialov], Zhukov N.P., Majnikova N.F., Muromcev Ju.L., Rogov I.V., Orlov V.V.; Assignee Tambov military aviation engineering Institute.
6. Patent RU No 02149386 RF, MPK G01N 25/18 (2000), *Method of determining thermophysical characteristics of materials* [Sposob opredelenija teplofizicheskikh harakteristik materialov], Klebanov M.G., Fesenko A.I.; Assignee THMAES.
7. Patent US No 6676287 V1 MPK G01K15/00 (2004), *The direct measurement of thermal conductivity* [Sposob prjamogo izmerenija teploprovodnosti], Mathis Nancy, Chandler Christina; Assignee Mathis Instruments Ltd.
8. Bulat, L.P. etc. (2002), *Termoelektricheskoe ohlazhdenie* [Thermoelectric cooling], St. Petersburg, 147 p.

ющих устройств, Москва, Издательство стандартов, 1984, 52 с.

10. СТБ 1971–2009 (2010), *Система стандартов безопасности труда. Одежда пожарных боевая. Общие технические условия*, Минск, Госстандарт, 2010, 36 с.

11. ГОСТ 12088-77 (1979), *Материалы текстильные и изделия из них. Метод определения воздухопроницаемости*, Москва, Издательство стандартов, 1979, 11 с.

9. RD 50-411-83 (1984), *Methodical instructions. The flow of liquids and gases. The measurement technique using a special constriction devices* [Metodicheskie ukazaniya. Rashod zhidkостей i gazov. Metodika vypolneniya izmerenij s pomoshh'ju special'nyh suzhajushhih ustrojstv], Moscow, 52 p.

10. STB 1971–2009 (2010), *The system of occupational safety standards. Clothing fire fighting. General specifications* [Sistema standartov bezopasnosti truda. Odezhda pozharnyh boevaja. Obshhie tehnicheckie uslovija], Minsk, 36 p.

11. GOST 12088-77 (1979), *Textile materials and products from them. Method for determination of air permeability* [Materialy tekstil'nye i izdelija iz nih. Metod opredelenija vozduhopronicaemosti], Moscow, 11 p.

Статья поступила в редакцию 29. 08. 2016 г.