

УДК 677.017

Д.Я. Баринов¹, А.В. Зуев¹, В.Н. Окулов²**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩЕЙ
СПОСОБНОСТИ МАТЕРИАЛОВ РАБОЧЕЙ ОДЕЖДЫ
ДЛЯ СОТРУДНИКОВ АВИАЦИОННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-123-130

Эксплуатационные характеристики создаваемых в настоящее время материалов и изделий авиационной техники зависят от обеспечения комфортных условий для работы человека. Такие условия, особенно в зимний период, во многом определяются качеством одежды и обуви. В статье приводятся результаты экспериментальных исследований теплопроводности разных типов стелек для обуви. Предложены физическая и математическая модели теплопереноса при перемещении человека из теплого помещения на улицу. Изучена теплоизолирующая способность трех типов стелек для обуви и показано время, в течение которого сохраняются оптимальные условия для обеспечения работоспособности человека.

Ключевые слова: теплопроводность, стельки, обувь, математическое моделирование, рабочая одежда, теплоизолирующая способность.

D.Ya. Barinov¹, A.V. Zyev¹, V.N. Okulov²**STUDY OF THE INSULATING ABILITY
OF WORKING CLOTHES FOR EMPLOYEES
OF AVIATION ENTERPRISES**

Operational characteristics of currently created materials and products of aviation equipment. Such conditions, especially in the winter period, largely correspond to the quality of clothes and shoes. The paper presents the results of experimental studies of the thermal conductivity of different types of insoles for shoes. Physical and mathematical models of heat transfer are proposed when a person moves from a warm room to the street. The thermal insulation ability of three types of insoles for shoes was studied and time is shown.

Keywords: thermal conductivity, insoles, shoes, mathematical modeling, working clothes, insulating ability.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

²ООО «РД Дистрибьюция» [Limited liability company «PD Distributcia»]; e-mail: vokulov@gmail.com

Введение

В последнее время в России активно создаются и развиваются изделия авиационной техники – как для военных, так и гражданских целей [1]. В связи с этим появляются новые материалы конструкционного и функционального назначения. Первые включают в себя большую группу материалов на различной основе, среди которых стоит выделить металлы и сплавы, керамические композиционные материалы, а также полимерные композиционные материалы (стеклопластики, углепластики, органопластики и т.д.) в виде различных полуфабрикатов [2–4]. Вторые включают, например, теплозащитные и теплоизоляционные материалы, антифрикционные, износостойкие, антиокислительные, диэлектрические покрытия и многие другие [5–7].

На качество производимых материалов, эксплуатационные характеристики создаваемых изделий и уровень воплощения задумок конструкторов все еще оказывает влияние человеческий фактор, несмотря на попытки его исключить с помощью методов автоматизации и робототехники [8]. При возникновении условий, некомфортных для работы инженеров и технологов на предприятиях аэрокосмической отрасли, снижается качество производства. Поэтому на первый взгляд незначительная проблема охраны труда и создания комфортных условий для работы персонала становится важной и актуальной.

Обеспечение комфортных условий жизнедеятельности человека во многом зависит от качества одежды и обуви. Это особенно важно в холодное время года, когда увеличиваются тепловые потери тела человека. При снижении температуры тела в первую очередь наблюдается дискомфорт, а при дальнейшем снижении следуют потеря сознания и летальный исход.

Известно, что наиболее быстро охлаждаются конечности человека – руки и ноги. Это связано с особенностями внутренней терморегуляции тела человека и качеством защитной одежды и обуви. Во избежание переохлаждения жизненно важных органов организм будет жертвовать наименее важными частями тела человека – его конечностями [9]. Тепловая изоляция рук решается достаточно просто – с помощью различных средств (варежки, перчатки грелки и др.). Однако для защиты стоп необходимо использовать материалы, также обеспечивающие комфортную ходьбу. Одними из важных составляющих обуви, обеспечивающих комфорт, являются стельки, поэтому от их качества во многом зависит работоспособность человека.

Стельки для обуви выполняют несколько основных функций: обеспечение равномерного распределения давления от массы человека по всей площади стопы, тепловая изоляция от холодного наружного воздуха, поглощение неприятных запахов. В связи с этим зачастую изготавливают многослойные стельки со специальными добавками и пропитками, обеспечивающими им дополнительные функциональные свойства. В качестве материалов для производства стелек применяют текстиль, шерсть, мех, войлок, латекс и др. [10].

Теплоизолирующая способность материалов зависит от значений их теплофизических характеристик. Одной из основных теплофизических характеристик теплоизоляционного материала для изготовления стелек для обуви является теплопроводность. Существуют как стационарные, так и нестационарные методы для определения теплопроводности, среди которых стоит отметить импульсный метод и методы стационарного теплового потока и горячей охранной зоны.

Импульсный метод позволяет быстро (время измерения при одной температуре составляет порядка нескольких минут) определять теплопроводность в широком диапазоне температур (например, ФГУП «ВИАМ» располагает оборудованием для исследований в диапазоне температур от -120 до $+2800$ °С) в различных газовых средах на сравнительно небольших образцах (с характерным размером 10–20 мм) [11, 12]. Суть метода заключается в кратковременном облучении фронтальной поверхности образца импульсом, генерируемым лазером или лампой, и регистрации температуры на тыльной поверхности образца. По анализу зависимости изменения температуры судят о температуропроводности и теплопроводности. При проведении измерений вводят ряд ограничений и допущений на габаритные размеры образца и параметры импульса, а для обработки получаемых сигналов используют несколько математических моделей [13]. Кроме того, для определения теплопроводности важно измерять теплоемкость и плотность в требуемом диапазоне температур. Следует также отметить, что в связи с особенностями метода необходимо нанесение специального покрытия (металлического, графитового) на поверхность образца. Однако в случае использования гибких волокнистых материалов с низкой плотностью эта задача сопряжена с рядом трудностей технического характера.

Методы стационарного теплового потока и горячей охранной зоны являются альтернативными методами определения теплопроводности материалов. Они позволяют непосредственно измерить теплопроводность теплоизоляционного материала с высокой точностью без необходимости проведения дополнительных исследований, однако требуют сравнительно больших образцов (характерный размер образца должен быть не меньше 150 мм) и длительного времени измерения при одной температуре (~1–3 ч) [14]. Оборудование ФГУП «ВИАМ» позволяет проводить измерения в диапазоне температур от -150 до +600 °С.

Как правило, толщина стелек в исходном состоянии находится в диапазоне от 3 до 6 мм, при этом поверхность может быть волокнистой со значительной пористостью (например, шерсть). Это накладывает ограничения на применение импульсного метода при проведении соответствующих исследований. Так, теплопроводность шерстяного слоя невозможно напрямую определить импульсным методом, который позволяет без существенных затруднений провести исследования латекса или войлока. В то же время при качественном и количественном сравнениях нескольких вариантов материалов целесообразно применять единый метод исследований.

Цель данной статьи – исследование теплопроводности различных вариантов стелек для обуви и анализ их теплоизолирующей способности с помощью метода математического моделирования теплопереноса. Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.2. «Квалификация и исследования материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [15].

Материалы и методы

Объектом исследований являются многослойные стельки для обуви трех типов: всесезонные, зимние на основе шерсти и зимние на основе войлока. Всесезонные стельки имеют трехслойную конструкцию: верхний слой представляет собой тканевую вязкую основу; средний слой изготавливается из вспененного латекса с антибактериальной пропиткой, обеспечивающего равномерное распределение давления от массы тела по всей площади и повышение комфорта при ходьбе; нижний слой из вспененного латекса с добавками активированного угля формирует контакт с поверхностью обуви и устраняет неприятные запахи.

Зимние стельки для обуви также состоят из трех слоев: нижний слой представляет собой фольгу и обеспечивает механическую защиту стельки от износа; средний слой состоит из вспененного латекса и является демпфирующим и теплоизолирующим; верхний слой из уплотненного войлока или пористой шерсти обеспечивает дополнительную теплоизоляцию и комфорт. Типы стелек показаны на рис. 1.



Рис. 1. Типы стелек: *a* – всесезонные; *б* – зимние на основе шерсти; *в* – зимние на основе войлока

Исследование теплопроводности стелек для обуви проводили стационарным методом по ГОСТ 7076–99 на приборе НFM 436 фирмы Netzsch (Германия). Этот прибор позволяет измерять теплопроводность теплоизоляционных материалов в диапазоне

температур от -20 до +70 °С. Для измерений необходимы образцы в виде плит размером от 150×150 до 300×300 мм. Толщина образца может быть различной – от 5 до 100 мм. Прибор работает на основе метода стационарного теплового потока, в соответствии с которым через образец, закрепляемый между нагревателем (верхняя плита) и холодильником (нижняя плита), устанавливается одномерный стационарный тепловой поток. Верхняя и нижняя плиты оснащены датчиками теплового потока (тепломерами). Прибор также позволяет автоматически определять толщину образца, а теплопроводность определяют по закону Фурье согласно выражению

$$q = -\lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x},$$

где q – тепловой поток, проходящий через образец, Вт/м²; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); ΔT – разность температур между верхней и нижней гранями образца, К; Δx – толщина образца, м [16].

Перед проведением измерений необходимо выполнить калибровку датчиков теплового потока. Для этого в режиме «коррекция» проведены измерения эталонного образца с известными значениями теплопроводности, в результате чего создан калибровочный файл.

Анализ влияния теплопроводности стелек для обуви на их теплоизолирующую способность проводили с помощью математического моделирования теплопереноса в одномерной постановке задачи. В качестве объекта для моделирования рассматривали многослойный пакет, состоящий из подошвы обуви, стельки и стопы человека. Температуру внешней поверхности подошвы принимали равной температуре окружающей среды, начальная температура стельки и подошвы составляла 22 °С, стопы 28 °С. Необходимо принять, что при выполнении работы средней тяжести среднее тепловыделение взрослого человека составляет 120–150 Вт [17]. Для объекта моделирования заданы геометрические характеристики (толщины слоев) и температурные граничные условия. При проведении расчетов считалось, что стелька не сминается под действием массы человека при ходьбе. Теплоперенос в таком случае описывается одномерным нестационарным уравнением теплопроводности в виде

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad} T(x, \tau)) + Q,$$

где ρ – плотность материала, кг/м³; c – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К); λ – теплопроводность материала, Вт/(м·К); T – температура, К; τ – время, с; Q – внутренние источники тепла, Дж/кг.

Граничное условие на внешней поверхности подошвы имеет вид

$$T(0, \tau) = T_{\text{oc}},$$

где T_{oc} – температура окружающей среды, К.

Результаты и обсуждение

Перед проведением измерений теплопроводности изготовили образцы из стелек для обуви путем их подрезки для обеспечения плотного прилегания друг к другу и набора двух слоев из стелек каждого типа. Результаты исследования теплопроводности стелек для обуви трех типов в диапазоне температур от -10 до +20 °С приведены в таблице.

Теплопроводность стелек для обуви

Тип стелек	Теплопроводность, Вт/(м·К), при температуре, °С			Толщина образца, мм
	-10	0	20	
Всесезонные	0,055	0,055	0,054	7,3
Зимние на основе шерсти	0,041	0,042	0,042	10,0
Зимние на основе войлока	0,039	0,040	0,040	8,8

Как видно из таблицы, исследуемые стельки для обуви обладают низкой теплопроводностью. Это связано с использованием вспененных и волокнистых материалов. Из-за применения в основе всесезонных стелек вспененного латекса их теплопроводность несколько выше, чем у зимних. При сравнении теплопроводности зимних стелек видно, что более плотный (а следовательно, менее подверженный смятию по сравнению с шерстью) войлок незначительно снижает теплопроводность.

Полученные результаты по теплопроводности стелек для обуви использовали при анализе их теплоизолирующей способности с помощью математического моделирования теплопереноса. Считали, что теплоемкость стелек составляет $1700 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, плотность $400 \text{ кг}/\text{м}^3$. Предполагали, что подошва обуви изготовлена из полиуретана со следующими теплофизическими характеристиками: теплопроводность $0,15 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, теплоемкость $1380 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, плотность $1200 \text{ кг}/\text{м}^3$. Для расчетов принимали, что теплопроводность стопы человека составляет $0,48 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, теплоемкость $3400 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, плотность $1036 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Проводили также моделирование нестационарного теплопереноса для определения времени, при котором наблюдаются комфортные для работы человека условия. Критерием комфортных условий считается температура стопы, не опускающаяся ниже $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Расчетным случаем являлся выход человека из помещения на улицу, при этом температура окружающей среды должна быть постоянной и равной $+10 \text{ }^\circ\text{C}$ (расчетный случай 1), $0 \text{ }^\circ\text{C}$ (расчетный случай 2) и $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ (расчетный случай 3).

Моделирование проводили с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics [18], который позволяет выполнять многодисциплинарные расчеты теплопереноса с помощью метода конечных элементов. Геометрическая и конечно-элементная модели задачи представлены на рис. 2. Толщину подошвы обуви принимали 15 мм .

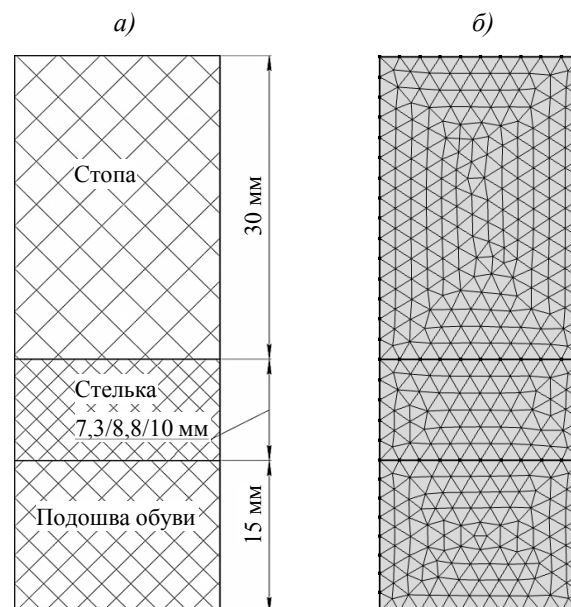


Рис. 2. Геометрическая (а) и характерная конечно-элементная (б) модели задачи

На рис. 3 приведены зависимости температуры стопы от времени нахождения человека на улице при различной температуре окружающего воздуха и использовании стелек разного типа. Видно, что в начальный момент времени наблюдается переходный процесс, сменяющийся монотонным охлаждением стопы до температуры окружающего воздуха. Установлено, что время достижения критической температуры стопы человека

25 °С при использовании всепогодных стелек и зимних стелек на основе шерсти и на основе войлока при температуре на улице +10 °С составляет 105, 145 и 140 мин соответственно; при температуре 0 °С: 75, 104 и 98 мин; при температуре -10 °С: 61, 84 и 80 мин.

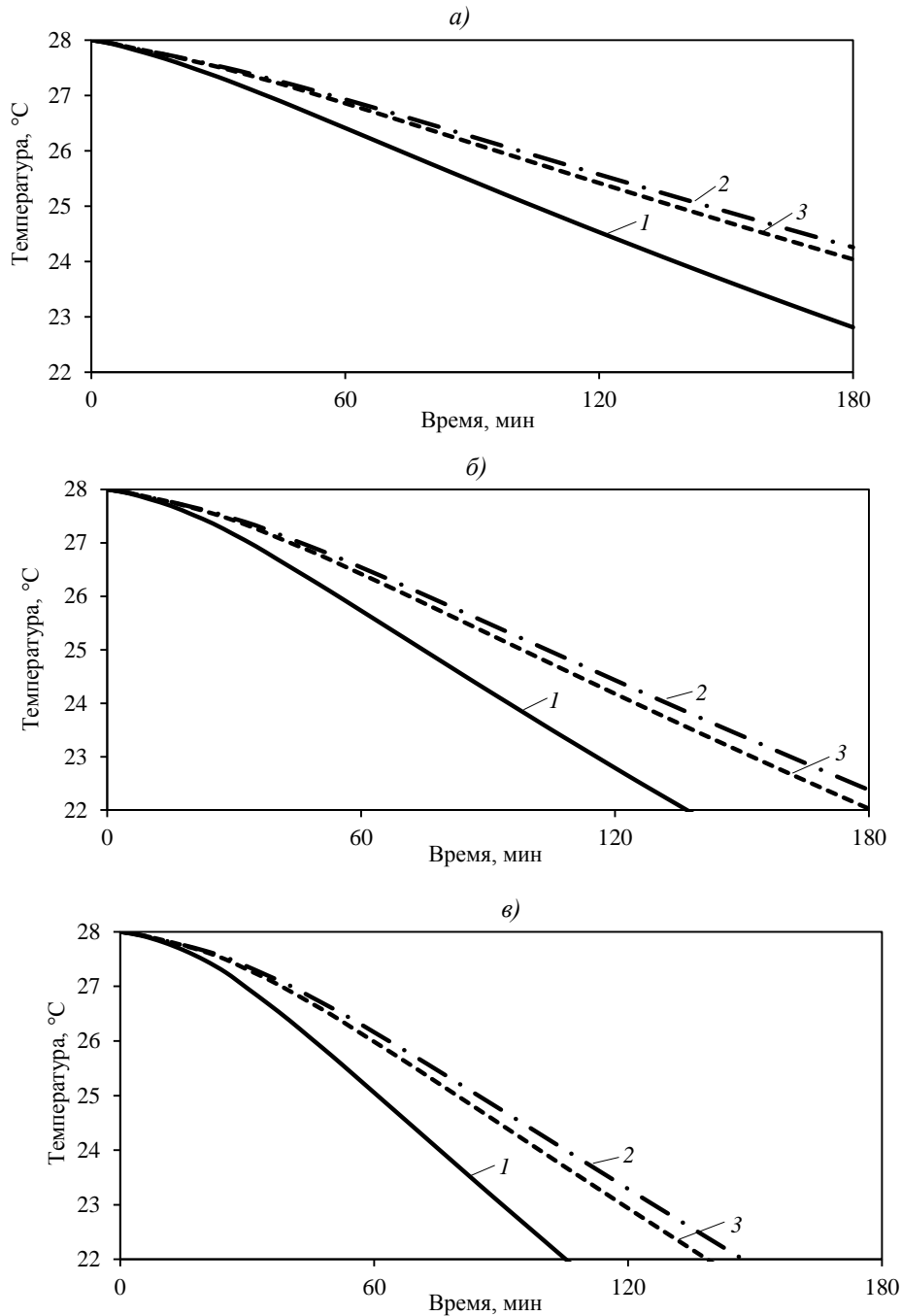


Рис. 3. Зависимости температуры стопы от времени нахождения человека на улице при температуре окружающего воздуха +10 (а), 0 (б), -10 °С (в) в обуви с разными видами стелек: 1 – всепогодные; 2 – зимние на основе шерсти; 3 – зимние на основе войлока

Можно заметить, что материал зимних стелек незначительно влияет на продолжительность комфортного нахождения человека на улице. Разница составляет 4–6 мин.

Это связано с различной теплопроводностью стелек. Однако время комфортного нахождения человека в обуви со всепогодными стельками меньше соответствующего времени нахождения в обуви с зимними стельками на 19–40 мин, что соответствует 25–26% от общего времени нахождения на улице. Меньшее время при этом соответствует меньшей температуре окружающего воздуха.

Заключения

Исследована теплопроводность стелек для обуви различных типов с помощью метода стационарного теплового потока в диапазоне температур от -10 до $+20$ °С. Установлено, что теплопроводность всепогодных стелек, в основе которых лежит вспененный латекс, составляет $0,055–0,054$ Вт/(м·К), а теплопроводность зимних стелек, состоящих из слоев вспененного латекса и шерсти и войлока, – соответственно $0,041–0,042$ и $0,039–0,040$ Вт/(м·К).

Предложена физическая модель, на основе которой построена математическая модель, описывающая теплоперенос в объекте, состоящем из подошвы обуви, стельки и стопы человека. Модели учитывают основные процессы – теплопроводность и внутренние источники тепла.

С помощью разработанной математической модели проведено моделирование теплопереноса в объекте, состоящем из подошвы обуви, стельки и стопы человека. Установлено, что комфортное время нахождения человека на улице при использовании всепогодных стелек и зимних стелек на основе шерсти и на основе войлока при температуре окружающего воздуха $+10$ °С составляет 105, 145 и 140 мин соответственно; при температуре 0 °С: 75, 104 и 98 мин; при температуре -10 °С: 61, 84 и 80 мин.

Библиографический список

1. Новинки российской авиатехники на МАКС-2019. URL: <https://ria.ru/20190906/1558386399.html> (дата обращения: 17.06.2020).
2. Житнюк С.В. Бескислородные керамические материалы для аэрокосмической техники (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2018. №8 (68). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.06.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-81-88.
3. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. №1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
4. Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Комарова О.А., Раскутин А.Е., Гуняева А.Г. Конструкционные полимерные угленаноконкомпозиты – новое направление материаловедения // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2011. №12. С. 2–9.
5. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия – Буран» / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука и жизнь, 2013. 128 с.
6. Елисеев О.А., Наумов И.С., Смирнов Д.Н., Брык Я.А. Резины, герметики и огне-теплозащитные материалы // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 437–451. DOI: 10.18577/2071-9140-017-0-S-437-451.
7. Нефедов Н.И., Семенова Л.В., Кузнецова В.А., Веренинова Н.П. Лакокрасочные покрытия для защиты металлических и полимерных композиционных материалов от старения, коррозии и биоповреждения // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 393–404. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-393-404.
8. Колядов Е.В., Межин Ю.А. Автоматизация технологического процесса получения монокристаллических отливок из жаропрочных сплавов на установках типа УВНК // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2016. №4 (40). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.06.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-32-40.

9. Медико-санитарная часть МВД России по Саратовской области: офиц. сайт Федерального казенного учреждения здравоохранения. URL: <https://xn--11aks.64.xn--b1aew.xn--p1ai/document/6654393> (дата обращения: 17.06.2020).
10. Стельки. Их виды и функции. URL: <https://gutboot.ru/poleznye-stati/307-stelki-ikh-vidy-i-funksii.html> (дата обращения: 17.06.2020).
11. ASTM E 1461–01. Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method. 2001. P. 1–13.
12. ГОСТ Р 57943–2017. Пластмассы. Определение теплопроводности и температуропроводности. Часть 4. Метод лазерной вспышки. М.: Стандартинформ, 2017. 11 с.
13. Blumm J., Opfermann J. Improvement of the mathematical modeling of flash measurements // High Temperatures – High pressures. 2002. Vol. 34. P. 515–521. DOI: 10.1068/htjr061.
14. ГОСТ 7076–99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2000. 22 с.
15. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
16. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
17. Технические таблицы. Физика человека. Тепловыделение человека в зависимости от вида нагрузки. Сухое и скрытое тепло. URL: <http://tehtab.ru/Guide/Engineers/HumanBeing/MetabolicHeatGain/> (дата обращения: 17.06.2020).
18. Введение в COMSOL Multiphysics. 2018. 216 с. URL: https://cdn.comsol.com/doc/5.4/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru_RU.pdf (дата обращения: 17.06.2020).