Данный текст является русскоязычной версией опубликованной на английском языке статьи и представлен в авторской редакции только на данном сайте!

UDC 691.175 Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-2-155-162

For citation: Bychkovsky V. S., Butorin D. V., Bakanin D. V., Filippenko N. G., Livshits A. V. Volume temperature control at automated high frequency processing of polymer and composite materials. *Siberian Journal of Science and Technology*. 2020, Vol. 21, No. 2, P. 155–162. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-2-155-162.

Для цитирования: Объемный контроль температуры при автоматизированной высокочастотной обработке полимерных и композиционных материалов / В. С. Бычковский, Д. В. Буторин, Д. В. Баканин и др. // Сибирский журнал науки и технологий. 2020. Т. 21, № 2. С. 155–162. Doi: 10.31772/2587-6066-2020-21-2-155-162.

ОБЪЕМНЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ОБРАБОТКЕ ПОЛИМЕРНЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. С. Бычковский*, Д. В. Буторин, Д. В. Баканин, Н. Г. Филиппенко, А. В. Лившиц

Иркутский государственный университет путей сообщения Российская Федерация, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15 *E-mail: bikovskii_vs@mail.ru

Целью данной работы является разработать и обосновать способ объемного контроля температуры полимерного и композиционного материала при автоматизированной высокочастотной обработке. Разработанный способ реализуется путем внедрения термопар в тело образца по форме призмы или куба по определенной схеме их расположения по всему объему. Данная методика проста в реализации и экономически выгодна по сравнению со стоимостью дорогого и специализированного оборудования со сложной конструкцией и самих термопар, имеющих простую конструкцию.

Методами достижения поставленной цели исследований контактного способа объемного контроля температуры полимерного или композиционного образца являются разработка и построение схемы расположения термопар по всему объему так, чтобы выявить наиболее точно температурный спектр полимерного или композиционного образиа при автоматизированной высокочастотной обработке. Разработана схема расположения термопар. Следующим методом для достижения поставленной цели стал метод выяснения влияния на точность измерений температуры нагрева образца в зависимости от внедрения в него термопар за счет выполнения в нем отверстий для их установки. Для этого выполнен конечно-разностный математический расчет зависимости температуры образца от количества отверстий под термопары в нем в программном комплексе MSC Patran Sinda. Результаты расчета сведены и представлены на графических данных. Далее был выполнен обший математический расчет no формулам расчета процесса теплоu массопроводности. Итогами данного расчета стали таблица и графические данные.

По окончании конечно-разностного и общего математического расчета произведен сравнительный анализ полученной погрешности измерения температуры от внедрения термопар в тело образца. Исходя из этого анализа, можно сказать, что разработанная методика применима для дальнейшего исследования автоматизированной

высокочастотной обработки полимерных и композиционных материалов, так как полученные погрешности не превышают допустимых 3 %.

Ключевые слова: полимеры, высокочастотный нагрев, конечно-элементная математическая модель, общая математическая модель.

VOLUME TEMPERATURE CONTROL AT AUTOMATED HIGH-FREQUENCY PROCESSING OF POLYMER AND COMPOSITE MATERIALS

V. S. Bychkovsky*, D. V. Butorin, D. V. Bakanin, N. G. Filippenko, A. V. Livshits

Irkutsk State Transport University 15, Chernyshevsky Av., Irkutsk, 664074, Russian Federation *E-mail: bikovskii_vs@mail.ru

Abstract. The purpose of this work is to develop and justify a method for volumetric temperature control of a polymer and composite material in automated high-frequency processing. The developed method is implemented by introducing thermocouples into the sample body in the shape of a prism or cube according to a certain pattern of their location throughout the volume. This technique is simple to implement and cost-effective compared to the cost of expensive and specialized equipment with complex design, compared to the cost of thermocouples themselves, having a simple design.

Methods to achieve the purpose of research of the contact method of volumetric temperature control of a polymer or composite sample are: development and construction of the layout of thermocouples throughout the volume, so as to identify the most accurate temperature spectrum of the polymer or composite sample during automated high-frequency processing. The developed arrangement of thermocouples; The next method to achieve this purpose was the method of finding out how it will affect the accuracy of measurements of the heating temperature of the sample from the introduction of thermocouples by making holes in it for installation. For this, a finite-difference mathematical calculation of the dependence of the sample temperature on the number of holes for thermocouples in it was performed in the MSC Patran Sinda software package. The calculation results are summarized and are presented on graphic data. Next, a general mathematical calculation was performed according to the formulas for calculating the process of heat and mass conductivity. The results of this calculation were table and graphic data.

At the end of the finite-difference and general mathematical calculation, a comparative analysis of the obtained error of temperature measurement from the introduction of thermocouples into the body of the sample is performed. Based on this analysis, we can say that the developed method is applicable for further research on automated high-frequency processing of polymer and composite materials, since the errors obtained don't exceed the permissible 3 %.

Keywords: polymers, high-frequency heating, finite element mathematical model, general mathematical model.

Введение. Для увеличения эксплуатационных и прочностных свойств формирования повышенной износостойкости, повышения ресурса эксплуатации полимеров и композитов и исключения сухого старта во время эксплуатации создаются маслонаполненные полимерные и композиционные антифрикционные материалы по разработанной технологии высокочастотного маслонаполнения [1]. При этом реализация способа имеет одну из проблем при автоматизации процесса из-за необходимости постоянного контроля температуры образца по всему объему во время сушки и самого наполнения [1–6]. Исследования в данной области являются актуальными.

Цель и задачи. Разработать контактный способ измерения температуры полимерного образца по всему объему при высокочастотной обработке.

Для достижения указанной цели необходимо решение следующих задач:

– построение схемы расположения термопар в теле полимерного образца;

 построение конечно-элементной математической модели по расчету влияния количества термопар на нагрев образца при высокочастотной обработке;

 построение общей математической модели по расчету влияния количества термопар на нагрев образца при высокочастотной обработке;

– сравнительный анализ полученных результатов.

Исходные данные. Образец из материала ПА6 ТУ 224-001-78534599-2006; габаритные размеры – 50 х 50 х 4 мм; плотность – 1120 кг/м³; удельная теплоемкость – 1601 Дж/кг·К; теплопроводность – 0,23 Вт/(м·К). Термопара (ТП) хромель-алюмель; диаметр спая – 0,25 мм; диаметр провода – 0,1 мм; размеры отверстия – 0,25х25 мм [7–10].

Предварительная схема расположения термопар в образце представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема расположения термопар в образце Fig. 1. Layout of thermocouples in the sample

Конечно-разностный математической расчет. Построение конечно-разностной математической модели по расчету влияния количества термопар на нагрев образца при высокочастотной обработке выполнялось в программном комплексе MSC Patran Sinda (рис. 2).

В качестве граничных условий были приняты: мощность объемного нагрева постоянная – 10 Вт; коэффициент конвективной теплопроводности постоянный – 10 Вт/(К·м²); температура окружающей среды – 20 °С [11–14].



Рис. 2. Конечно-разностная математическая модель опытного образца Fig. 2. The finite-difference mathematical model of the prototype

По результатам расчетов MSC Patran Sinda, приведенных в табл. 1, построена диаграмма зависимости температур от количества отверстий под термопары в полимерном образце (рис. 3).

Таблица 1

Сводная таблица результатов расчета MSC Patran Sinda Ко-во термопар, Температура на плоскости Температура на Температура на стенке симметрии, °С поверхности тела, °С отверстия, °С шт. 220,746 202,701 0 220,251 221,500 203,516 1 2 221,546 203,538 220,263 3 221,625 203,569 220,282 4 221,630 203,558 220,271 5 203,575 220,293 221,678





Из полученных графических данных можно сделать вывод, что при высокочастотном разогреве по мере увеличения количества отверстий в теле температура полимерного образца увеличивается по всему объему.

Расчет погрешности, возникшей от установки термопар в полимерный образец, производился по формуле

$$\Delta_1 = 100 - \frac{T_{\delta e \circ TTI} \cdot 100}{T_{5 \text{ TTI}}} = 100 - \frac{220,746 \cdot 100}{221,500} = 0,34 \%.$$
(1)

где $T_{6e_3 T\Pi}$ – температура в теле полимерного образца без отверстий, °C; $T_{5T\Pi}$ – температура в теле полимерного образца с 5 отверстиями, °C;

Результаты построения конечно-элементной математической модели показали, что рассчитанное значение погрешности не превышает допустимого значения 3 % [15].

Общий математический расчет. Построение общей математической модели производилось по расчету влияния количества термопар на нагрев образца при высокочастотной обработке.

Процесс объемного разогрева полимерного образца размерами 50 x 50 x 4 мм от внутренних источников тепла отнесем к частному случаю теплопроводности однородной пластины.

Источники тепла равномерно распределены по всему объему $q_v = const$. Коэффициент конвективной теплоотдачи $\alpha = const$ и температура окружающей среды $T_{air} = const$. Благодаря равномерному охлаждению температуры обеих поверхностей пластины одинаковы [16; 17].

При указанных условиях температура пластины будет изменяться только вдоль оси x (рис. 4), направленной по нормали к поверхности тела. Температуры на оси пластины и ее поверхности обозначим соответственно через T_0 и T_{nob} . Эти температуры неизвестны. Кроме того, необходимо найти распределение температуры в пластине и количество тепла, отданного в окружающую среду, по формуле

$$T(x) = T_{_{\theta O3}} + \frac{q_{_{\nu}} \cdot \delta}{\alpha} + \frac{q_{_{\nu}}}{2 \cdot \lambda} (\delta^2 - x^2), \quad \delta \le x \le \delta, \quad (2)$$

где Т_{воз} – температура окружающей среды (воздуха), 20 °С; α – коэффициент конвективной теплопередачи, 10 Вт/(град·м²); λ – коэффициент теплопроводности полимера (ПА 6), 0,26 Вт/(град·м); δ – крайнее положение точки, контактирующей с окружающей средой, 0,002 м; q_{ν} – объемная производительность внутренних источников теплоты, Вт/м³.



Рис. 4. Расчетная схема теплопроводности однородной пластины Fig. 4. Calculation scheme of thermal conductivity of a homogeneous plate

Объемная производительность внутренних источников теплоты рассчитывается по формуле

$$q_{v} = \frac{Q}{V}, \qquad (3)$$

где Q – тепловая мощность от каждого внутреннего источника теплоты, 10 Вт; V – объем тела, м³.

Результаты расчетов объемной производительности внутренних источников теплоты сведены в табл. 2.

Результаты расчетов объемной производительности внутренних источников теплоты

Таблица 2

V, м³ Кол-во отв. под ТП, шт. q_v , BT/M³ $1.00000 \cdot 10^{-5}$ $1.000 \cdot 10^{6}$ 0 9.99877.10-6 $1,001 \cdot 10^{6}$ 1 9.99754.10-6 2 $1,002 \cdot 10^{6}$ 9,99631.10-6 $1.004 \cdot 10^{6}$ 3 9,99508.10-6 4 $1,005 \cdot 10^{6}$ 9,99385.10-6 $1,006 \cdot 10^{6}$ 5

Температура на поверхности тела ($x = \delta$)

$$T_{noe} = T_{eo3} + \frac{q_{\nu} \cdot \delta}{\alpha} \,. \tag{4}$$

Температура на плоскости симметрии (x = 0)

$$T_0 = T_{no\theta} + \frac{q_v \cdot \delta^2}{2 \cdot \lambda}.$$
 (5)

Результаты расчетов температуры на поверхности тела и на плоскости симметрии сведены в табл. 3.

Пусть заданы граничные условия третьего рода, т. е. температура окружающей среды со стороны наружной поверхности и постоянный коэффициент теплоотдачи на внешней поверхности [17–19].



Рис. 5. Расчетная схема температуры на стенке отверстия Fig. 5. Calculation diagram of the temperature on the wall of the hole

Зависимость температурного поля рассчитывается по формуле

$$T(r) = T_{_{\theta O3}} + \frac{q_{_{\nu}} \cdot \delta}{2\alpha} \cdot \left[1 - \left(\frac{\delta_r}{\delta}\right)^2\right] + \frac{q_{_{\nu}} \cdot \delta^2}{4\lambda} \cdot \left[1 + \left(\frac{\delta_r}{\delta}\right)^2 \cdot 2\ln\frac{r}{\delta} - \left(\frac{r}{\delta}\right)^2\right], \, \delta_r \le r \le \delta \,, \quad (6)$$

где δ_r – радиус отверстия под термопару, 0,000125 м.

Перепад температур между поверхностью тела и теплоотдающей поверхностью стенки отверстия рассчитывается по формуле (7)

$$T_{cmeh.omb.} - T_{nob.} = \frac{q_v \cdot \delta_r^2}{4\lambda} \cdot \left[\left(\frac{\delta}{\delta_r} \right)^2 - 2\ln \frac{\delta}{\delta_r} - 1 \right], \tag{7}$$

отсюда (8)

$$T_{cmeh.omb.} = \frac{q_v \cdot \delta_r^2}{4\lambda} \cdot \left[\left(\frac{\delta}{\delta_r} \right)^2 - 2\ln \frac{\delta}{\delta_r} - 1 \right] + T_{nob.}$$
(8)

где *Т*_{стен. отв}. – температура на стенке отверстия, °С

Результаты расчетов температуры на стенке отверстия сведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчетов температуры на поверхности тела, плоскости симметрии и стенке отверстия

Кол-во отв. под ТП,	T_{HOB} °C	$T_{0}, \circ C$	$T_{\text{CTEH, OTB}}$ °C
ШТ.		0,	
0	220,000	227,692	-
1	220,246	227,948	224,029
2	220,493	228,204	224,280
3	220,741	228,462	224,553
4	220,989	228,719	224,785
5	221,238	228,978	225,039



Рис. 6. Результаты общего математического расчета Fig. 6. Results of the General mathematical calculation

Из полученных зависимостей видно, что при увеличении отверстий в теле увеличивается температура как на поверхности образца, так и на стенке отверстия. Это можно объяснить уменьшением объема образца, влекущим за собой увеличение объемной производительности внутренних источников теплоты при постоянной мощности.

Расчет погрешности, возникшей от установки термопар в полимерный образец (1)

$$\Delta_2 = 100 - \frac{T_{\delta e s T \Pi} \cdot 100}{T_{5 \text{ TII}}} = 100 - \frac{227,692 \cdot 100}{228,978} = 0,57 \%.$$

где T_{без ТП} – температура в теле полимерного образца без отверстий, °C; T_{5TП} – температура в теле полимерного образца с 5 отверстиями, °C.

Результаты построения общей математической модели показали, что рассчитанное значение погрешности не превышает допустимого значения 3 %.

Сравнительный анализ. Сравнительный анализ проводился при расчете погрешности, возникающей от количества отверстий под термопары, выполненном при помощи конечноэлементной модели в программном комплексе MSC Patran Sinda ($\Delta_1 = 0.34$ %), и общей математической модели по расчетным формулам ($\Delta_2 = 0.57$ %). Итогом проведённого исследования является соответствие выбранного метода построения математической модели результатам конечно-элементного анализа, а также правильности способа измерения температуры полимерного образца.

Заключение. В данной работе сформирован метод определения температуры тела полимерного образца по всему объему. Данный метод реализован с внедрением термопар в тело полимерного или композиционного образца.

Для составленной схемы расположения термопар в теле полимерного образца с целью контроля температуры объемного нагрева при высокочастотной обработке была математически обоснована применимость данной схемы. Проведен сравнительный анализ погрешности измерений, возникшей от изменения объема образца вследствие внедрения в него термопар, не превышающей допустимых 3 % [1].

Данный метод в дальнейшем планируется использовать для осуществления автоматизированного высокочастотного процесса маслонаполнения [2], а именно идентификации параметров технологического наполнения процесса жидким пластификатором путем контроля изменения показания термопар.

Библиографические ссылки

1. Термовакуумное нанесение самосмазывающегося покрытия полимерных материалов узлов трения машин и механицизмов транспортного машиностроения / В. С. Бычковсий, Н. Г. Филиппенко, С. И. Попов, А. С. Попов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 2 (58). С. 58–64.

2. Установка для сварки пластмасс. Паспорт УЗП 2500А, 412. 921.055. Завод «Промышленная электроника Габрово», 1987. 60 с.

3. Development and automation of the device for determination of thermophysical properties of polymers and composites / D. V. Butorin, D. V. Bakanin, V. S. Bychkovskiy et al. // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 982. P. 731–740.

4. Чернышов В. Н., Чернышова Т. И. Микроволновые методы и системы контроля теплофизических характеристик материалов и изделий : монография. Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. 124 с.

5. Кудряшов Ю. Б., Перов Ю. Ф., Рубин А. Б. Радиационная биофизика радиочастотные и микроволновые электромагнитные излучения : учебник для вузов. М. : Физматлит, 2008. 184 с.

6. Лившиц А. В. Управление технологическими процессами высокочастотной электротермии полимеров // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. № 3. С. 120–126.

7. Устройство диагностики деталей из полиамидных материалов. Ларченко А.Г., Лившиц А.В., Филиппенко Н.Г., Попов С.И.; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный университет путей сообщения; заявл. 05.04.2013; опубл. 10.09.2013.

8. Пат. 2168156 Российская Федерация^{МПК7} G21C17/112. Способ измерения максимальной температуры объекта при нагревании его облучением электронным пучком / А. П. Суржиков, А. М. Притулов, С. А. Гынгазов, Е. Н. Лысенко, Р. С. Шабардин ; заявитель и патентообладатель Томский политехнич. ун-т ; заявл. 15.11.1999 ; опубл. 27.05.2002, Бюл. № 4.6 с.

9. Калинчев Э. Л., Соковцева М. Б. Выбор пластмасс для изготовления и эксплуатации изделий : справоч. изд. Л. : Химия, 1987. 416 с.

10. ГОСТ 10589–87 Полиамид 610 литьевой. Технические условия. Центр информаций технологий Российская государственная библиотека / под ред. Т. В. ; Web-мастер Козлова Н. В. М. : 2007 [Электронный ресурс]. URL: http://www.rsl.ru (дата обращения 08.04.2020).

11. Исследование изменения температуры полимерного образца при высокочастотном разогреве в зависимости от изменения объема тела и влияния конвекции / В. С. Бычковский, Н. Г. Филиппенко, Д. В. Баканин, А. С. Курайтис // Молодая наука Сибири. 2018. № 1(1). С. 56–63.

12. Палымский И. Б. Численное моделирование сложных режимов конвекции Рэлея-Бенара. Механика жидкости, газа и плазмы : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск, 2011. 206 с.

13. Разработка методики определения структурных превращений в полимерных материалах / Д. В. Буторин, Н. Г. Филиппенко, С. Н. Филатова и др. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 4 (48). С. 80–86.

14. Results of the complex studies of microstructural, physical and mechanical properties of engineering materials using innovative methods / V. I. Shastin, S. K. Kargapoltcev, V. E. Gozbenko et al. // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12, No. 24. P. 15269–15272.

15. Зайдель А. Н. Погрешности измерений физических величин : учебник. Л. : Наука, 1985. 112 с.

16. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен / Б. Гебхарт, И. Джалурия, Р. Махаджан, Б. Саммакия : пер. с английского. Кн. 1. М. : Мир, 1991. 678 с.

17. Брюханов О. Н., Шевченко С. Н. Тепломассообмен : учебник. М. : НИЦ Инфра-М, 2013. 464 с.

18. Цветков Ф. Ф. Тепломассообмен : учебник для вузов. М. : МЭИ, 2011. 562 с.

19. Пат. 2014154288/28 Российская ФедерацияМПК7 RU 155337 U1 на полезную модель. Устройство для определения коэффициентов теплоотдачи / А. А. Александров, А. В. Лившиц, Н. Г. Филиппенко, С. И. Попов, С. Н. Филатова ; заявитель и патентообладатель Иркутский гос. ун-т путей сообщения ; заявл. 10.10.2015 ; опубл. 30.12.2014.

References

1. Bychkovsiy V. S., Filippenko N. G., Popov S. I., Popov A. S. [Thermal vacuum deposition of a self-lubricating coating of polymeric materials of friction units of machines and mechanisms of

transport engineering]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie.* 2018, Vol. 58, No. 2, P. 58–64 (In Russ.).

2. Ustanovka dlya svarki plastmass., Pasport UZP 2500A, 412. 921.055. [Installation for welding plastics. Passport UZP 2500A, 412.921.055]. 1987, 60 p.

3. Butorin D. V., Bakanin D. V., Bychkovskiy V. S., Filippenko N. G., Kuraytis A. S. Development and automation of the device for determination of thermophysical properties of polymers and composites. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020, Vol. 982, P. 731–740.

4. Chernyshov V. N., Chernyshova T. I. *Mikrovolnovyye metody i sistemy kontrolya teplofizicheskikh kharakteristik materialov i izdeliy. Monografiya* [Microwave methods and systems for monitoring the thermophysical characteristics of materials and products. Monograph]. Tambov, TGTU Publ., 2015, 124 p.

5. Kudryashov Yu. B., Perov Yu. F., Rubin A. B. *Radiatsionnaya biofizika radiochastotnyye i mikrovolnovyye elektromagnitnyye izlucheniya* [Radiation biophysics, radio-frequency and microwave electromagnetic radiation. Textbook for higher education]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, 184 p.

6. Livshits A. V. [Process control of high-frequency electrothermal polymers]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii*. Moscow, 2015, No. 3, P. 120–126 (In Russ.).

7. Larchenko A. G., Livshits A. V., Filippenko N. G., Popov S. I. *Ustroystvo diagnostiki detaley iz poliamidnykh materialov* [Diagnostic device for parts made of polyamide materials]. Patent RF, no. 2013115531/28, 2013.

8. Surzhikov A. P., Pritulov A. M., Gyngazov S. A., Lysenko E. N., Shabardin R. S. *Sposob izmereniya maksimal'noy temperatury ob"yekta pri nagrevanii yego oblucheniyem elektronnym puchkom* [The method of measuring the maximum temperature of an object when it is heated by irradiation with an electron beam]. Patent RF, no. 2168156, 1999.

9. Kalinchev E. L., Sokovtseva M. B. *Vybor plastmass dlya izgotovleniya i ekspluatatsii izdeliy. Spravochnoye izdaniye* [The choice of plastics for the manufacture and operation of products. Reference edition]. Leningrad, Khimiya Publ., 1987, 416 p.

10. GOST 10589–87 Polyamide 610 injection molding. Technical conditions Technology Information Center Russian State Library. Available at: http://www.rsl.ru (accessed 08.04.2020).

11. Bychkovsky V. S., Filippenko N. G., Bakanin D. V., Kuraitis A. S. [Investigation of the temperature change of a polymer sample during high-frequency heating depending on changes in body volume and the effect of convection]. *Molodaya nauka Sibiri*. 2018, Vol. 1, No. 1, P. 56–63 (In Russ.).

12. Palymsky I. B. *Chislennoye modelirovaniye slozhnykh rezhimov konvektsii Releya-Benara. Mekhanika zhidkosti, gaza i plazmy. Dokt. Diss.* [Numerical modeling of complex Rayleigh-Benard convection modes. Mechanics of fluid, gas and plasma. Doct. Diss.]. Novosibirsk, 2011, 206 p.

13. Butorin D. V., Filippenko N.G., Filatova S.N., Livshits A. V., Kargapoltsev S. K. [Development of a method for determining structural transformations in polymeric materials]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie.* 2015, Vol. 48, No. 4, P. 80–86 (In Russ.).

14. Shastin V. I., Kargapoltcev S. K., Gozbenko V. E., Livshits A. V., Filippenko N. G. Results of the complex studies of microstructural, physical and mechanical properties of engineering materials using innovative methods. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, Vol. 12, No. 24, P. 15269–15272.

15. Zaydel' A. N. *Pogreshnosti izmereniy fizicheskikh velichin. Uchebnik* [Errors of measurements of physical quantities. Textbook]. Leningrad, Nauka Publ., 1985, 112 p.

16. Gebkhart B., Dzhaluriya I., Makhadzhan R., Sammakiya B. *Svobodnokonvektivnyye techeniya, teplo- i massoobmen* [Free convective flows, heat and mass transfer]. Moscow, Mir Publ., 1991, 678 p.

17. Bryukhanov O. N., Shevchenko S. N. *Teplomassoobmen*. [Heat and mass transfer]. Moscow, INFRA-M Publ., 2013, 446 p.

18. Tsvetkov F. F. *Teplomassoobmen* [Heat and mass transfer]. Moscow, MEI Publ., 2011, 562 p.

19. Alexandrov A. A., Livshits A. V., Filippenko N. G., Popov S. I., Filatova S. N *Ustroystvo dlya opredeleniya koeffitsiyentov teplootdachi* [Device for determining heat transfer coefficients].. Patent RF, no. 2014154288/28, 2014.

© Бычковский В. С., Буторин Д. В., Баканин Д. В., Филиппенко Н. Г., Лившиц А. В., 2020

Бычковский Владимир Сергеевич – аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения. E-mail: bikovskii_vs@mail.ru.

Буторин Денис Витальевич – кандидат технических наук, доцент; Иркутский государственный университет путей сообщения. E-mail: den_butorin@mail.ru.

Баканин Денис Викторович – аспирант, Иркутский государственный университет путей сообщения. E-mail: denis.bakan@mail.ru.

Филиппенко Николай Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, Иркутский государственный университет путей сообщения. E-mail: pentagon@mail.ru.

Лившиц Александр Валерьевич – доктор технических наук, профессор, Иркутский государственный университет путей сообщения. E-mail: livnet@list.ru.

Bychkovsky Vladimir Sergeevich – Ph. D. student, Irkutsk State Transport University. E-mail: bikovskii_vs@mail.ru.

Butorin Denis Vitalievich – Ph. D., Irkutsk State Transport University. E-mail: denis. den_butorin@mail.ru.

Bakanin Denis Viktorovich – Ph.D. student, Irkutsk State Transport University. E-mail: denis.bakan@mail.ru.

Filippenko Nikolay Grigoryevich – Ph.D, Irkutsk State Transport University. E-mail: denis. pentagon@mail.ru.

Livshits Alexander Valerievich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Irkutsk State Transport University. E-mail: livnet@list.ru.