

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

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

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 prism-shaped or cube-shaped sample body according to a certain pattern of their location throughout the volume. This technique is cost-effective and easy to implement compared to expensive and specialized equipment with complex design, as well as to the cost of thermocouples having a simple design.

Methods to achieve the purpose of the research of the contact method of volumetric temperature of a polymer or composite sample control are development and outlining thermocouples throughout the volume so as to identify the most accurate temperature spectrum of the polymer or composite sample during automated high-frequency processing. Another method to achieve this purpose is the method of finding out how it will affect the measurements accuracy of the heating sample temperature 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 were summarized and presented on graphic data. Further, a general mathematical calculation was performed according to the formulas for the process of heat and mass conductivity calculation, the results of which 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 was performed. Based on this analysis, the developed method is applicable for further research on automated high-frequency processing of polymer and composite materials, since the errors obtained do not exceed the permissible 3 %.

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

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 образца 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 термодпар за счет выполнения в нем отверстий для их установки. Для этого выполнен конечно-разностный математический расчет зависимости температуры образца от количества отверстий под термодпары в нем в программном комплексе MSC Patran Sinda. Результаты расчета сведены и представлены на графических данных. Далее был выполнен общий математический расчет по формулам расчета процесса тепло- и 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 термодпар 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.

Introduction. To enhance operational and strength properties of increased durability achievement, to improve polymers and composites service life and to prevent dry start during operation, oil-filled polymer and composite antifric-tion materials are created using developed technology of high-frequency oil filling [1]. At the same time, implementation of the method has one problem in the course of process automation due to the need of constant sample temperature volumetric control during drying and self-filling [1–6]. Research in this field proves to be a pressing task.

Purpose and tasks. To develop a contact method for measuring a polymer sample temperature throughout the volume during high-frequency processing.

In order to achieve this goal, the following tasks were defined:

- outlining thermocouples location in the polymer sample body;
- constructing a finite-element mathematical model by calculating the effect of thermocouples quantity on the sample heating during high-frequency processing.

– constructing a general mathematical model by calculating the effect of thermocouples quantity on sample heating during high-frequency processing.

– making comparative analysis of the obtained results.

Background data. Sample from material PA6 Specification 224-001-78534599–2006; overall dimensions, $50 \times 50 \times 4$ mm; density, 1120 kg/m³; specific heat capacity, 1601 J/kg K; thermal conductivity, 0.23 W/(m · K). Thermocouple (TC) chromel-alumel; weld diameter, 0.25 mm; wire diameter, 0.1 mm; hole dimensions, 0.25×25 mm [7–10].

Preliminary layout of thermocouples in the sample is shown in fig. 1.

Finite-difference mathematical calculation.

Construction of a finite-difference mathematical model based on the calculation of the number of thermocouples effect on the sample heating during high-frequency processing was carried out in the MSC Patran Sinda software complex (fig. 2, tab. 1).

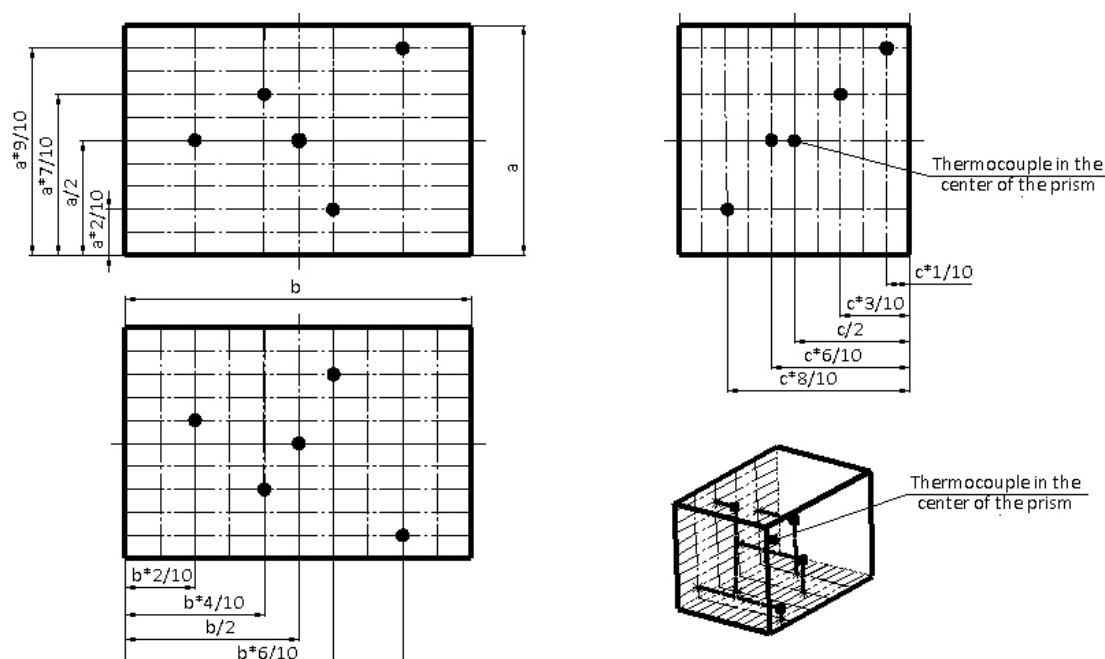


Fig. 1. Layout of thermocouples in the sample

Рис. 1. Схема расположения термодпар в образце

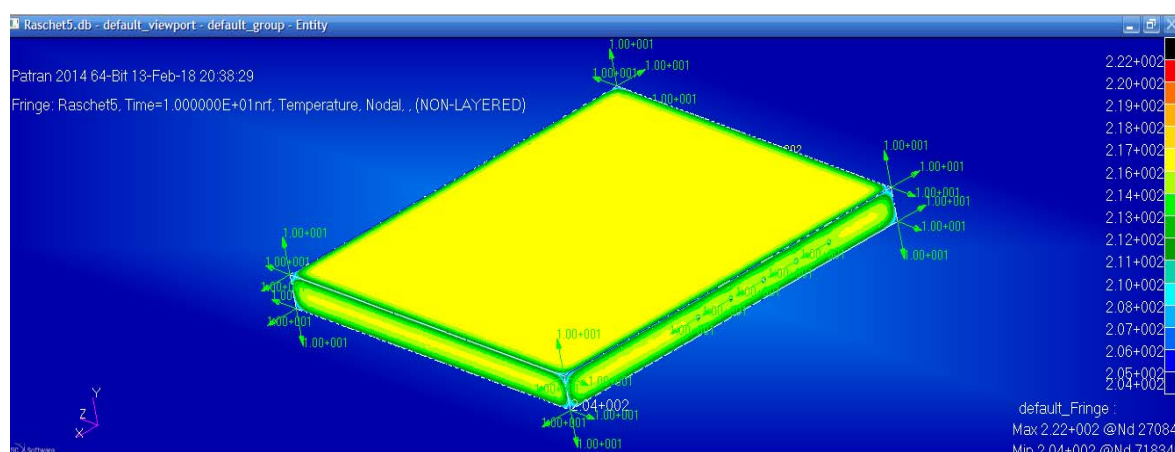


Fig. 2. The finite-difference mathematical model of the prototype

Рис. 2. Конечно-разностная математическая модель опытного образца

Table 1

Summary of calculation results MSC Patran Sinda

Quantity of thermocouples, in pcs.	Symmetry plane temperature, °C	Body surface temperature, °C	Hole walls temperature, °C
0	220.746	202.701	—
1	221.500	203.516	220.251
2	221.546	203.538	220.263
3	221.625	203.569	220.282
4	221.630	203.558	220.271
5	221.678	203.575	220.293

As boundary conditions, the following ones were adopted: volumetric heating power constant, 10 W; convective thermal conductivity coefficient constant, 10 W/(K · m²); ambient temperature, 20 °C [11–14].

According to the results of the calculations of MSC Patran Sinda given in tab.1, the diagram (fig. 3) of the temperature dependence on the number of holes for thermocouples in the polymer sample has been constructed.

From the obtained graphic data, it can be concluded that with high-frequency heating, as the number of holes in the body increases, the temperature of the polymer sample increases throughout the volume.

Calculation of error from thermocouples in polymer sample installation is done by formula

$$\Delta_1 = 100 - \frac{T_{\text{withoutTC}} \cdot 100}{T_{5\text{TC}}} =$$

$$= 100 - \frac{220,746 \cdot 100}{221,500} = 0,34 \%, \quad (1)$$

where $T_{\text{withoutTC}}$ – temperature in the body of a polymeric sample without holes, °C; $T_{5\text{TC}}$ – temperature in the polymeric sample body with 5 holes, °C.

Results of finite-element mathematical model construction showed that calculated error value does not exceed permissible value of 3 % [15].

General mathematical calculation. General mathematical model construction by calculating the effect of

thermocouples number on sample heating during high-frequency processing.

The process of volumetric heating of the polymer sample with dimensions of 50×50×4 mm, from internal heat sources can be referred to as a particular case of thermal conductivity of a homogeneous plate.

Heat sources are evenly distributed throughout the volume, $q_v = \text{const}$. Convective heat transfer coefficient, $\alpha = \text{const}$ and ambient temperature $T_{\text{air}} = \text{const}$. Due to uniform cooling, the temperatures of both surfaces are the same [16; 17].

Under these conditions, the temperature of the plate will vary only along the x-axis (fig. 4) normal to the surface of the body.

The temperatures on the axis of the plate and on its surface are indicated through T_0 and T_{surface} , respectively; these temperatures are unknown. In addition, it is necessary to find the temperature distribution in the plate and the amount of heat supplied to the environment according to formula

$$T(x) = T_{\text{air}} + \frac{q_v \cdot \delta}{\alpha} + \frac{q_v}{2 \cdot \lambda} (\delta^2 - x^2), \quad (2)$$

$$-\delta \leq x \leq \delta,$$

where T_{air} – ambient temperature (air), 20 °C; – convective heat transfer coefficient, 10 W/(deg m²); λ – polymer thermal conductivity coefficient (PA 6), 0.26 W/(deg m); δ – extreme position of the point in

contact with the environment, 0.002 m; q_v – volumetric productivity of internal heat sources, W/m³.

Volumetric capacity of internal heat sources is calculated according to formula

$$q_v = \frac{Q}{V}, \quad (3)$$

where Q – thermal power from each internal heat source, 10 W; V – body volume, m³.

The results of internal heat sources volumetric productivity calculations are summarized in tab. 2.

Body surface temperature ($x = \delta$)

$$T_{surface} = T_{air} + \frac{q_v \cdot \delta}{\alpha}. \quad (4)$$

Symmetry plane temperature ($x = 0$)

$$T_0 = T_{surface} + \frac{q_v \cdot \delta^2}{2 \cdot \lambda}. \quad (5)$$

The results of temperature calculations on the surface of the body and on the plane of symmetry are summarized in tab. 3.

Let the boundary conditions of the third type be given, i. e. the ambient temperature on the outside surface and the constant heat transfer coefficient on the outside surface (fig. 5) [17–19].

Temperature field dependence, formula

$$T(r) = T_{air} + \frac{q_v \cdot \delta}{2\alpha} \times \left[1 - \left(\frac{\delta_r}{\delta} \right)^2 \right] + \frac{q_v \cdot \delta^2}{4\lambda} \cdot \left[1 + \left(\frac{\delta_r}{\delta} \right)^2 \cdot 2 \ln \frac{r}{\delta} - \left(\frac{r}{\delta} \right)^2 \right], \quad (6)$$

$$\delta_r \leq r \leq \delta,$$

where δ_r – radius of the hole for thermocouple, 0.000125 m.

Temperature difference between body surface and heat-release surface of the hole wall, formula

$$T_{hole} - T_{surface} = \frac{q_v \cdot \delta_r^2}{4\lambda} \cdot \left[\left(\frac{\delta}{\delta_r} \right)^2 - 2 \ln \frac{\delta}{\delta_r} - 1 \right], \quad (7)$$

hence

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

where T_{hole} – hole wall temperature, °C

The results of the hole wall temperature calculations are given in tab. 3, fig. 6.

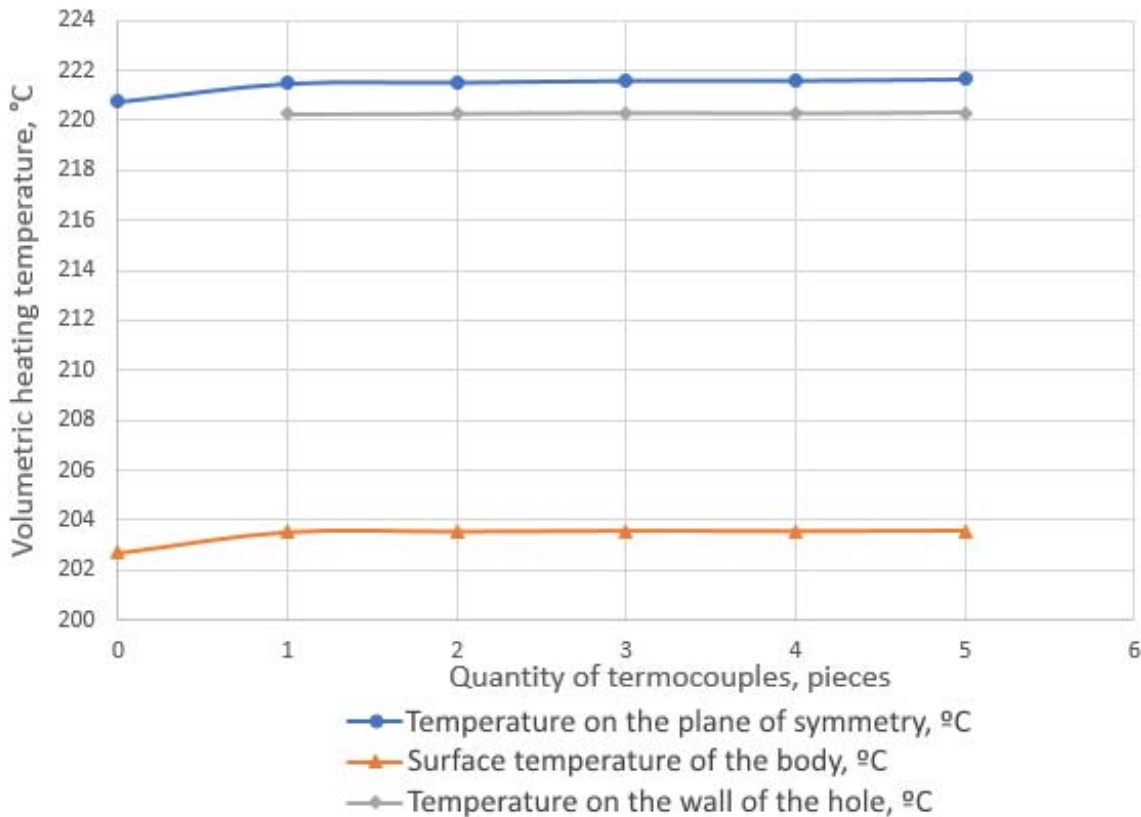


Fig. 3. Calculation results of MSC Patran Sinda

Рис. 3. Результаты расчетов MSC Patran Sinda

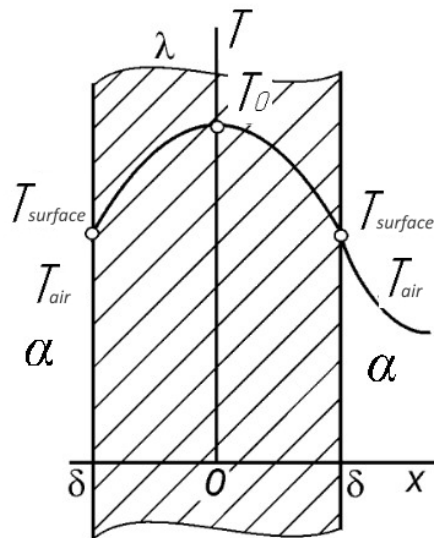


Fig. 4. Calculation scheme of thermal conductivity of a homogeneous plate

Рис. 4. Расчетная схема теплопроводности однородной пластины

Table 2

Summary of internal heat sources volumetric productivity calculations results

Quantity of thermocouples, pcs.	V, m^3	$q_v, \text{W/m}^3$
0	$1.00000 \cdot 10^{-5}$	$1.000 \cdot 10^6$
1	$9.99877 \cdot 10^{-6}$	$1.001 \cdot 10^6$
2	$9.99754 \cdot 10^{-6}$	$1.002 \cdot 10^6$
3	$9.99631 \cdot 10^{-6}$	$1.004 \cdot 10^6$
4	$9.99508 \cdot 10^{-6}$	$1.005 \cdot 10^6$
5	$9.99385 \cdot 10^{-6}$	$1.006 \cdot 10^6$

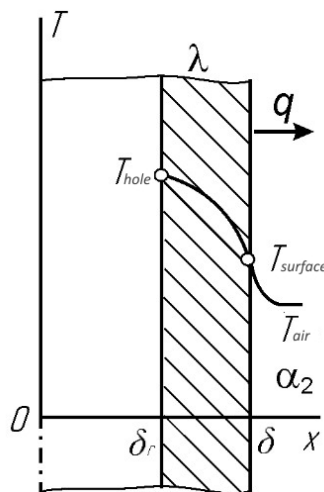


Fig. 5. Calculation diagram of the temperature on the wall of the hole

Рис. 5. Расчетная схема температуры на стенке отверстия

Table 3

The results of temperature calculations on the body surface, symmetry plane and on the walls of the hole

Quantity of thermocouples, pcs.	$T_{surface}, ^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$	$T_{hole}, ^\circ\text{C}$
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

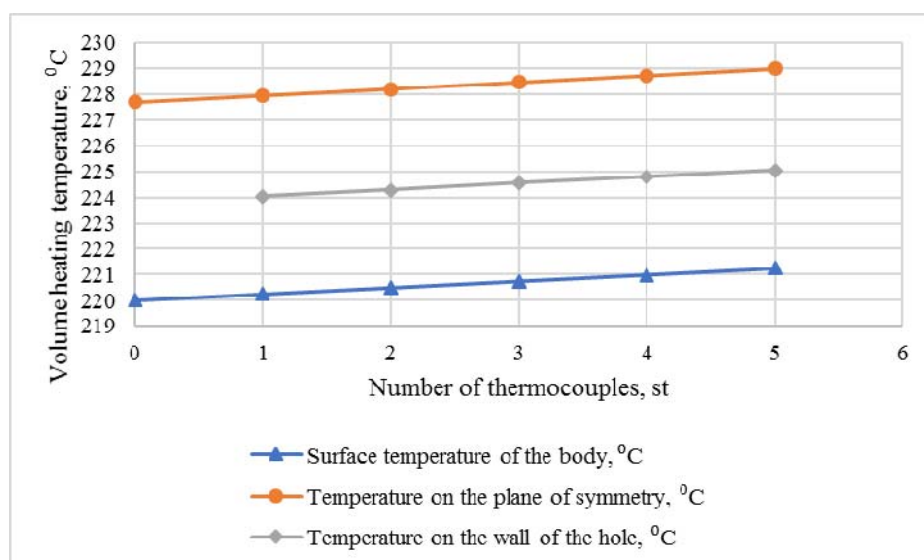


Fig. 6. Results of the General mathematical calculation

Рис. 6. Результаты общего математического расчета

From the obtained dependencies it can be seen that as the holes in the body increase, the temperature both on the surface of the sample and on the wall of the hole increases.

This can be explained by decrease in the sample volume, which entails an increase in the volumetric productivity of internal heat sources under continuous power.

Calculation of error from thermocouples installation in polymer sample (1)

$$\Delta_2 = 100 - \frac{T_{withoutTC} \cdot 100}{T_{5TC}} = 100 - \frac{227,692 \cdot 100}{228,978} = 0,57 \, \%$$

where $T_{withoutTC}$ – temperature inside the polymeric body sample without holes, $^\circ\text{C}$; T_{5TC} – temperature inside the polymeric body with 5 holes, $^\circ\text{C}$.

The results of the general mathematical model showed that the calculated error value does not exceed the permissible 3 %.

Comparative analysis. Error calculation from the number of holes for thermocouples was made applying the finite-element model in the software complex MSC Patran Sinda (0.34 %) and the general mathematical model according to the calculated formulas (0.57 %). The result of the study is the compliance of the chosen method of mathematical model construction with the result of

finite-element analysis, as well as the correctness of polymer sample temperature measuring method.

Conclusion. In the present work, a method of determining the polymer sample body temperature throughout entire volume has been developed. This method has been implemented with the introduction of thermocouples into the polymer or composite body sample.

For the constructed layout of thermocouples in the body of the polymer sample to control the temperature of volumetric heating during high-frequency processing, the applicability of this scheme has been mathematically justified. Comparative analysis of measurement error due to sample volume change caused by the introduction of thermocouples not exceeding permissible 3 % [1] has been carried out.

This method has been planned for further application in automated high-frequency oil filling process [2], namely, for identification of the parameters of the filling process with a liquid plasticizer by monitoring the change in thermocouple readings.

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]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye*. 2018, Vol. 58, No. 2, P. 58–64 (In Russ.).

2. *Ustanovka dlya svarki plastmass., Passport 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 oblucheniye elektronnyy 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 konveksii 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]. *Sovremennyye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovaniye*. 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., Dzhaluraya I., Makhadzhyan 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 koefitsiyentov teplootdachi* [Device for determining heat transfer coefficients]. Patent RF, no. 2014154288/28, 2014.

Библиографические ссылки

1. Термовакuumное нанесение самосмазывающегося покрытия полимерных материалов узлов трения машин и механизмов транспортного машиностроения / В. С. Бычковский, 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 / А. Г. Ларченко, А. В. Лившиц, Н. Г. Филиппенко, С. И. Попов ; 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. Суржилов, А. М. Притулов, С. А. Гынгазов, Е. Н. Лысенко, Р. С. Шабардин ; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет ; заявл. 15.11.1999 ; опубл. 27.05.2002, Бюл. № 4. 6 с.

9. Калинин 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 информации 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. Kargapoltsev, 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 англ. Кн. 1. М. : Мир, 1991. 678 с.

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

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

19. Пат. 2014154288/28 Российская Федерация МПК7 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.

© Bychkovsky V. S., Butorin D. V., Bakanin D. V., Filippenko N. G., Livshits A. V., 2020

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.

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.