

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

DOI: 10.15593/2224-9400/2024.3.10
УДК 631.171

Научная статья

Э.Ф. Фарзалиев

Иркутский государственный университет путей сообщения,
Иркутск, Российская Федерация

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА

Изучение различных математических моделей показало, что игнорирование коэффициента теплопередачи в температурном поле при нагреве системы недопустимо. Эксперименты показали, что учет коэффициента теплопередачи при нагреве технологической системы дает более точные результаты. Работа направлена на расчет коэффициента теплопередачи при нагреве системы, изготовленной из различных материалов, в программе Patran Sinda с целью создания математической модели нагрева этой системы. Эффективность радиочастотной сушки зависит от конвекции воздушного потока при различных скоростях обдува. В этой программе выполняются различные виды тепловых расчетов и расчетов прочности. Экспериментальные кривые охлаждения, характеризующие изменение температуры по всей площади технологической системы в процессе радиочастотной сушки, необходимы для параметрической идентификации зависящего от температуры коэффициента теплопередачи. Устройство для получения коэффициента теплопередачи будет описано ниже. Получены результаты расчета коэффициента теплоотдачи в процессе разработки математической модели. Этот коэффициент был определен при нагреве технологической системы, используемой для нагрева полимерных и композиционных материалов. Рассчитанные для определения коэффициента теплоотдачи кривые охлаждения соответствуют результатам, полученным с помощью программы Patran Sinda. Это подтверждает правильность построения математической модели процесса нагрева технологической системы сушки полимерных композиционных материалов. Вообще программа, для которой рассчитывается коэффициент теплоотдачи, является модульным специализированным решением, состоящим непосредственно из теплового решателя Sinda, собственного специального внешнего решателя диффузного излучения SindaRAD, который предназначен для расчета угловых геометрических коэффициентов (viewfactors) в моделях с внутренними источниками тепла. Модели для решателя Sinda можно строить в Patran.

Ключевые слова: полимер, сушка, коэффициент, теплопроводность, теплоотдача, полиэтилен, полипропилен.

E.F. Farzaliyev

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

CALCULATION OF THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF A POLYMER COMPOSITE

The study of various mathematical models has shown that ignoring the heat transfer coefficient in the temperature field when heating the system is unacceptable. Experiments have shown that taking into account the heat transfer coefficient when heating the technological system gives more accurate results. The work is aimed at calculating the heat transfer coefficient when heating a system made of various materials in the Patran Sinda program in order to create a mathematical model of heating this system. The efficiency of RF drying depends on the convection of the airflow at different blowing speeds. Various types of thermal and strength calculations are performed in this program. Experimental cooling curves characterizing the temperature change over the entire area of the technological system during radio frequency drying are necessary for parametric identification of the temperature-dependent heat transfer coefficient. The device for obtaining the heat transfer coefficient will be described below. The results of calculating the heat transfer coefficient in the process of developing a mathematical model are obtained. This coefficient was determined by heating the technological system used to heat polymer and composite materials. The cooling curves calculated to determine the heat transfer coefficient correspond to the results obtained using the Patran Sinda program. This confirms the correctness of constructing a mathematical model of the heating process of the technological drying system of polymer composite materials. In general, the program for which the heat transfer coefficient is calculated is a modular specialized solution consisting directly of the Sinda thermal solver, SindaRAD's own special external diffuse radiation solver, which is designed to calculate angular geometric coefficients (viewfactors) in models with internal heat sources. Models for the Sinda solver can be built in Patran.

Keywords: *polymer, drying, coefficient, thermal conductivity, heat transfer, polyethylene, polypropylene.*

Введение. Дифференциальные уравнения с нелинейно изменяющимися граничными условиями используются для исследования теплового поведения технических систем в нестационарных условиях. Решение этого уравнения для коэффициента теплоотдачи является нетривиальной задачей. Для определения этих коэффициентов был разработан современный компьютерный метод параметрической идентификации с использованием метода конечных разностей и соответствующего программного обеспечения [1, 2, 4]. Литературные исследования представляют программно-алгоритмические комплексы для определения коэффициента теплоотдачи на основе результатов экспериментов. Из-за использования уравнения Фурье – Кирхгофа для

описания теплового поля и применения метода конечных разностей для расчета дифференциальных уравнений входные данные для расчета включают параметры сетки, время теплообмена, физические свойства материала, температуру окружающей среды, начальную температуру и др. Для точности определения коэффициента теплоотдачи учитывается изменение теплофизических свойств в зависимости от различных факторов, таких как температура, влажность и т.п. Программный комплекс линейно интерполирует табличные данные для расчета теплофизических параметров.

Кроме того, при проведении исследований учитывается влияние различных факторов на тепловой процесс, таких как изменение теплопроводности материала при различных температурах, конвективный теплообмен со средой и радиационный теплообмен. Для уточнения параметров и повышения точности расчетов используются различные методы оптимизации, такие как методы наименьших квадратов и методы градиентного спуска.

Изучение нестационарных тепловых процессов в технологических системах имеет большое значение для оптимизации производственных процессов, повышения эффективности и качества продукции. Работа с параметрической идентификацией коэффициента теплоотдачи помогает оптимизировать проектирование систем охлаждения и прогнозировать поведение материалов в различных условиях эксплуатации.

Методика. Главными задачами для выполнения расчетов коэффициента теплоотдачи в специализированном программном обеспечении являются:

- снятие данных по кривым охлаждения технологической системы (рис. 1);
- расчет коэффициента теплоотдачи [5, 6, 9].

Прототип технологической системы, состоящий из двух латунных электродов (1, 5), изоляционных картонов (2, 4) и полимерного образца (3), был предварительно нагрет в муфельной печи до 80 °С. Затем образец извлекался из печи и охлаждался сначала на воздухе. Далее проводился эксперимент с повторным нагревом для осуществления принудительного охлаждения вентилятором (10) на различных скоростях. Температурный контроль осуществлялся цифровым термометром модели УТ 320 (7) с термопарами (6, 9), а полученные данные в виде графика передавались на персональный компьютер (8).

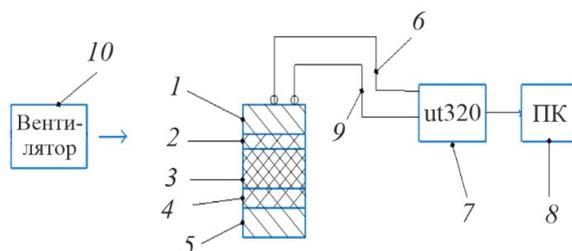


Рис. 1. Схема технологической установки

Таким образом, использование современных методов и программных комплексов для расчета коэффициента теплоотдачи в нестационарных тепловых полях технологических систем является важным инструментом при проектировании и оптимизации производственных процессов [4, 6, 9].

Для создания математической модели нагрева технологической системы, включающей электроды (латунь), электроизоляционный картон и смесь полимеров (полиэтилен, полипропилен), необходимо рассчитать коэффициент теплоотдачи нестационарной теплопроводности при нагреве. Для этого можно использовать программу MSC Sinda.

Основная часть. Решение этой системы уравнений в обратном направлении, связанное с коэффициентами теплоотдачи, является сложным из-за неустойчивости теплового поля, описываемого дифференциальным уравнением.

На рис. 2 показан алгоритм работы необходимого программного обеспечения.

На втором этапе производится расчет температурного поля заготовки с помощью разработанного специализированного программного обеспечения на основе предварительных данных, полученных на первом этапе. Учитывая, что разработанное программное обеспечение представляет собой уравнение Фурье – Кирхгофа с начальными и граничными условиями зависимости, расчеты проводятся численно методом конечных разностей, который является зависимым методом. Экспериментальные кривые охлаждения получены в течение 2 мин. Для вычисления коэффициентов использовано программное обеспечение, написанное на высокоуровневом языке C++ [1–4]. В интерфейсе программы (рис. 3) представлены функциональные окна, позволяющие задать теплофизические свойства, время выполнения, кривые охлаждения, определить коэффициент теплопередачи и выполнить графический вывод данных.

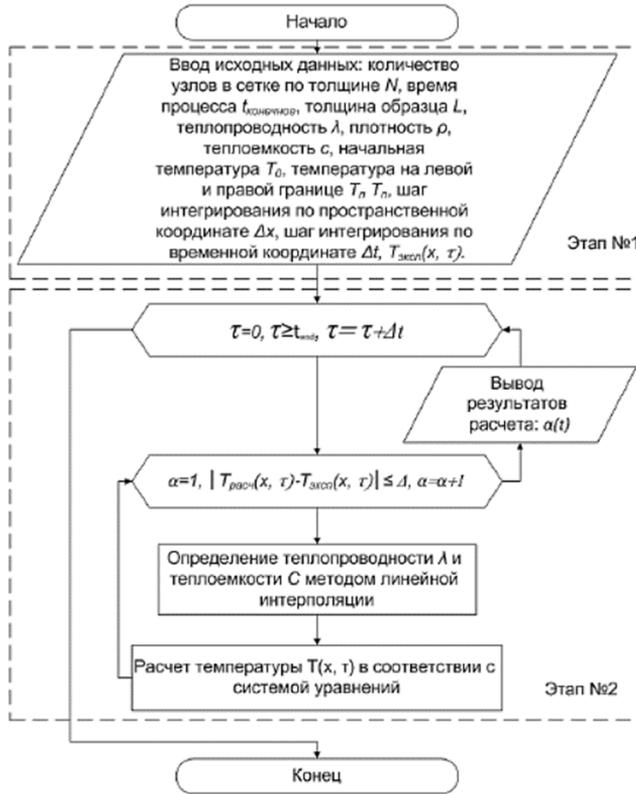


Рис. 2. Блок-схема программного комплекса для определения коэффициента теплоотдачи

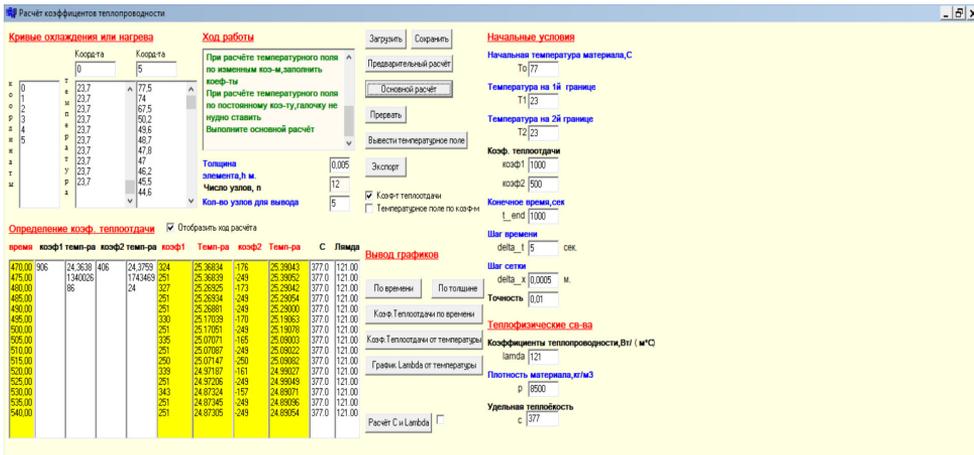


Рис. 3. Программный комплекс для определения коэффициента теплоотдачи 1 Вт/(м²·К)

Теплопередача по умолчанию равна 3 Вт/(м²·К) в единице измерения. В течение какого времени должен быть завершен окончательно-

ный тендер-расчет? Шагом по времени называется промежуток времени, в течение которого необходимо получить результаты расчетов. Шаг сетки – размер интервала толщины, который используется для извлечения результатов расчетов x . Точность – это величина, которая определяет соответствие между расчетными и экспериментальными значениями температуры $T(x, T)$. Показывать поле температуры тела – это функция, которая позволяет получить данные о температуре тела в таблице (рис. 4). Кнопка «Экспортировать» позволяет создать файл, который содержит таблицу с зависимостью коэффициента теплоотдачи $a(t)$ от температуры. Файл имеет расширение *.csv, что позволяет отображать данные в табличном формате с разделителями-запятыми [1, 4–7]. Файл нужен для импорта значений коэффициента теплопроводности $a(t)$ в программу MSC Sinda, которая используется для расчета нестационарных систем тепловых полей. Кнопка нужна для выполнения линейной интерполяции табличных данных теплофизических свойств в зависимости от температуры [3–5, 7, 12, 13].

t=715,00 сек:	24,1778	24,1803	24,1827	24,1852	24,1876	24,1900
t=720,00 сек:	24,2781	24,2796	24,2816	24,2842	24,2872	24,2900
t=725,00 сек:	24,3764	24,3780	24,3803	24,3830	24,3863	24,3900
t=730,00 сек:	24,3763	24,3791	24,3820	24,3848	24,3877	24,3900
t=735,00 сек:	24,4761	24,4780	24,4804	24,4833	24,4868	24,4900
t=740,00 сек:	24,4753	24,4783	24,4814	24,4844	24,4875	24,4900
t=745,00 сек:	24,4750	24,4780	24,4811	24,4842	24,4872	24,4900
t=750,00 сек:	24,3758	24,3798	24,3833	24,3863	24,3888	24,3900
t=755,00 сек:	24,3759	24,3788	24,3817	24,3845	24,3874	24,3900
t=760,00 сек:	24,3764	24,3792	24,3821	24,3849	24,3878	24,3900
t=765,00 сек:	24,2762	24,2800	24,2833	24,2861	24,2884	24,2900
t=770,00 сек:	24,2773	24,2799	24,2826	24,2852	24,2879	24,2900
t=775,00 сек:	24,3768	24,3785	24,3807	24,3835	24,3867	24,3900
t=780,00 сек:	24,3760	24,3788	24,3817	24,3845	24,3874	24,3900
t=785,00 сек:	24,3764	24,3792	24,3821	24,3850	24,3878	24,3900
t=790,00 сек:	24,4762	24,4781	24,4805	24,4835	24,4869	24,4900
t=795,00 сек:	24,4754	24,4784	24,4815	24,4846	24,4876	24,4900
t=800,00 сек:	24,4751	24,4782	24,4812	24,4843	24,4874	24,4900
t=805,00 сек:	24,4748	24,4779	24,4809	24,4840	24,4871	24,4900

Рис. 4. Температурное поле в табличном виде

На рис. 5 изображена последовательность шагов, которые необходимо выполнить при работе с программой, предназначенной для определения коэффициента теплоотдачи.

На второй стадии рассчитывается система неустойчивой температурной системы с помощью метода последовательного приближения. Для третьего этапа температура и коэффициент теплоотдачи определяются в формате таблицы csv Tx , T и экспериментальных кривых охлаждения (см. рис. 7).

Определение коэффициентов теплоотдачи осуществляется путем проведения последовательных приближений с применением специализированного программного обеспечения.

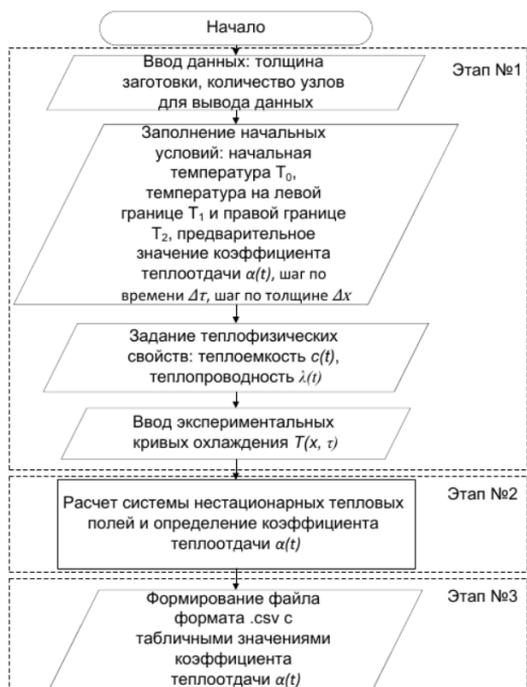


Рис. 5. Блок-схема работы с программным обеспечением

А снятие кривых охлаждения происходит на воздухе при различных скоростях обдува. Полученные результаты значений коэффициента теплопередачи отображены в графическом виде на рис. 6 [10–12, 15].

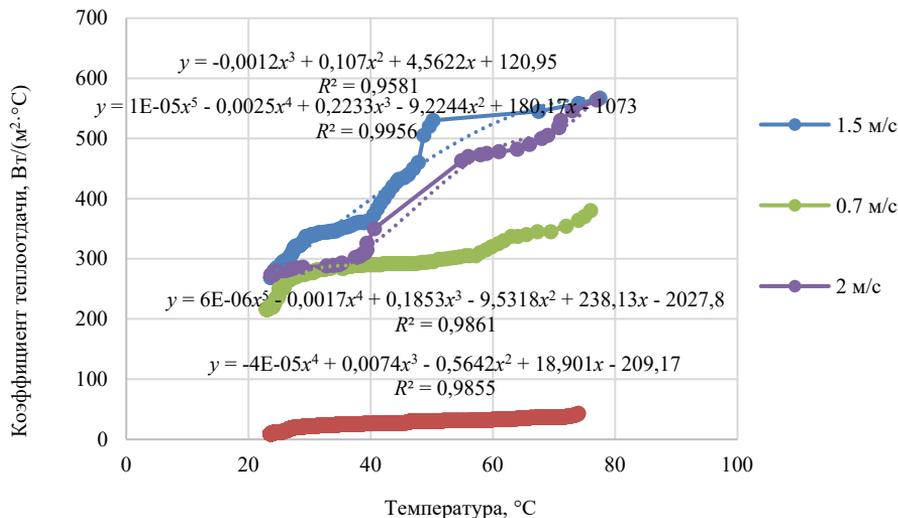


Рис. 6. Коэффициент теплоотдачи, используемый для оценки конвективного теплообмена между электродом из сплава ЛН65-5 (толщина $x=5$ мм) и полимерным композитом при температуре $76\text{ }^{\circ}\text{C}$

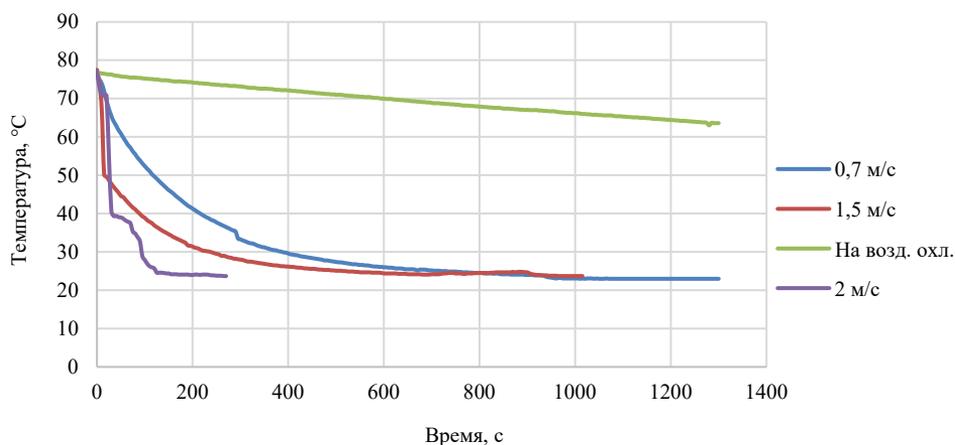


Рис. 7. Кривые охлаждения коэффициента теплоотдачи $a(t)$ совпадают друг с другом

Изучение зависимости коэффициента теплоотдачи от температуры поверхности охлаждаемого объекта показывает, что изменения коэффициента теплоотдачи неоднородны на определенных участках, указывая на нелинейное охлаждение из-за различных скоростей обдува при процессе охлаждения [6]. Для проверки коэффициента теплопередачи $a(t)$, зависящего от температуры, полученного с помощью программного пакета MSC Sinda, который широко используется в сложных тепловых расчетах, мы провели эксперименты по измерению коэффициента теплоотдачи при различных скоростях обдува: 0,7; 1,5 и 2 м/с (рис. 7). Также построили кривые охлаждения для разных скоростей воздушного охлаждения для последующего сравнения с экспериментальными данными. Полученные значения коэффициента теплоотдачи были использованы в расчетах [6, 7, 13–16].

Выводы. Представленная программа используется для расчета коэффициента теплоотдачи на основе экспериментальных кривых охлаждения. Эти кривые были внедрены в программный комплекс, который вычислил коэффициент теплоотдачи для дальнейшего создания математической модели в программе MSC Sinda.

Список литературы

1. Александров, А.А. Моделирование термических остаточных напряжений при производстве маложестких деталей: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / А.А. Александров. – Иркутск, 2014. – 164 с.

2. Иванов, Т.В. Теплообмен при кипении / Т.В. Иванов // Теплообмен в энергетических установках. – URL: http://twf.mpei.ac.ru/solodov/HMT-eBook_2009/HMT_E-Book/E-book/Chapt_18_Pool_Boiling.pdf (дата обращения: 7.06.2024).
3. Егоров, С.В. MSC Sinda – комплекс программных продуктов для решения тепловых задач [Электронный ресурс] / С.В. Егоров. – URL: <http://www.mssoftware.ru/products/sinda> (дата обращения: 7.06.2024).
4. Зайдес, В.Н. Industrial quenching oils – Determination of cooling characteristics – Nickel-alloy probe test method / В.Н. Зайдес. – Committee of Standards, 1995. – 9 p.
5. Fischer, F.D. The influence of different geometrical and thermal boundary conditions and the phase transformation on the residual stress state in railroad rails after heat-treatment / F.D. Fischer, E. Hinteregger, F.G. Rammerstorfer // International conference on residual stresses, 7–9 October, 2012. – Garmisch-Partenkirchen, Germany, 1989. – P. 467–473.
6. Базарова Ф.Ф. Органические и неорганические полимеры в конструкциях радиоэлектронной аппаратуры / Ф.Ф. Базарова. – М.: Сов. радио, 1974. – 160 с.
7. Пат. 146542 СССР, МПК H05B3/00. Устройство для определения коэффициента теплоотдачи / Е.Л. Суханов, Д.В. Будрин. – № 733442/26-10, заявл. 06.06.1961; опубл. 06.06.1962, Бюл. № 8. – 6 с.
8. Пат. 2008635 Рос. Федерация, МПК G01K17/20. Датчик теплового потока / А.Е. Александров, А.Г. Галянов, Д.Г. Русев, Б.А. Прусаков. – № 4632035/10, заявл. 09.01.1989; опубл. 28.02.1994, Бюл. № 4. – 6 с.
9. Пат. 2039092 Рос. Федерация, МПК C21D1/54, C21D1/56, C21D1/60. Способ определения охлаждающей способности жидкой среды и устройство для его осуществления / Э.Л. Аэро, В.С. Анисимов; заявитель и патентообладатель Институт высокомолекулярных соединений РАН. – № 4844918/02, заявл. 11.04.1990; опубл. 09.07.1995, Бюл. № 4. – 6 с.
10. Барвинский, И.А. Проблемы литья под давлением изделий из термопластичных материалов: спаи / И.А. Барвинский // Полимерные материалы: изделия, оборудование, технологии. – М.: Отраслевые ведомости, 2009. – № 7. – С. 25–33.
11. Берлинер, М.А. Автоматическое управление процессами сушки / М.А. Берлинер // Автоматизация процессов сушки в промышленности и сельском хозяйстве. – М.: Машгиз, 1963. – С. 8–22.
12. Разработка ин формационной системы для моделирования и визуализации роста сельскохозяйственных культур в условиях изменения климата / Д.В. Гончаров, О.А. Иващук, Е.А. Долгих, И.И. Гончарова // Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2023. – Т. XIX, № 4 (34). – С. 5–14. DOI: 10.26200/GST0U.2023.46.48.006
13. Пат. 2001131534 Рос. Федерация, МПК G01M15/00. Способ определения коэффициента теплоотдачи твердых тел / В.А. Калинин, В.И. Куре-

пин, Р.Ф. Новоселов; заявитель и патентообладатель Научно-исследовательский институт механики и прикладной математики при Ростовском государственном университете. – № 93042904/25, заявл. 27.08.1993; опубл. 20.12.1995.

14. Пат. 93042904 Рос. Федерация, МПК G01N25/18. Способ определения коэффициента теплоотдачи / М.Н. Жорник; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение „Сатурн“». – № 2001131534/06, заявл. 21.11.2001; опубл. 27.06.2003.

15. Пат. 1044149 Рос. Федерация, МПК G01K17/20, F01D5/18. Способ определения коэффициента теплоотдачи от поверхности конвективно охлаждаемых элементов / В.М. Сапожников, Г.П. Нагога. – № 3413826/06, заявл. 31.03.1982; опубл. 10.12.2005.

16. Пат. 1559860 Рос. Федерация, МПК G01K17/20. Устройство для определения коэффициента теплоотдачи / Э.А. Болтенко, О.А. Судницын. – № 4389540/10, заявл. 09.03.1988; опубл. 27.05.1997.

References

1. Alexandrov A. A., Modelirovanie termicheskikh ostatochnykh naprjazhenij pri proizvodstve malozhestkih detalej [Modeling of thermal residual stresses in the production of low-rigid parts], Ph. D. thesis. Irkutsk, 2016, no. 2, 164 p .

2. Ivanov T.V., Teploobmen pri kipeni. Teplomassoobmen v jenergeticheskikh ustanovkah [Heat transfer during boiling, Heat and mass transfer in power plants]. *Access mode* http://tw.t.mpei.ac.ru/solodov/HMT-eBook_2009/HMT_E-Book/E-book/Chapt_18_Pool_Boiling.pdf, 2009, no. 4, pp 25-39

3. Egorov S.V. MSC Sinda – kompleks programmnyh produktov dlja reshenija teplovyh zadach [MSC Sinda, set of software products for solving thermal problems] [Electronic resource]”, *Access mode*: <http://www.mscsoftware.ru/products/sinda>, 2010, no. 2, 123 p.

4. Zajdes V.N., ISO 9950:1995(E). Industrial quenching oils, Determination of cooling characteristics, Nickel-alloy probe test method, Committee of Standards, 1995, no. 6, 9 p

5. Fischer F. D., Hinteregger E.S., Rammerstorfe F. G. The influence of different geometrical and thermal boundary conditions and the phase transformation on the residual stress state in railroad rails after heat-treatment, *International conference on residual stresses*, 2005 no. 4, pp 27-31.

6. Bazarova F. F. Organicheskie i neorganicheskie polimery v konstrukcijah radioelektronnoj apparatury [Organic and inorganic polymers in the structures of radioelectronic equipment], 1974, no. 2, 160 p.

7. Suhanov E. L., Budrin D. V. Ustrojstvo dlja opredelenija koeficienta teplootdachi [A device for determining the heat transfer coefficient] Patent 146542 (USSR), IPC H05B3/00.”, in; application 06.06.1961; no. 8, pp 5 (1962).

8. Alexandrov A.E., Galyanov A.G., Rusev D.G., Prusakov B.A. Datchik teplovogo potoka [Heat flow sensor] Patent Rossiiskaia Federatsiia no.2008635, (1994).

9. Ajero Je.L., Anisimov V.S., Sposob opredelenija ohlazhdajushhej sposobnosti zhidkoj sredy i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija / zajavitel' i patentoobladatel' Institut vysokomolekuljarnyh soedinenij RAN [A method for determining the cooling capacity of a liquid medium and a device for its implementation, applicant and patent holder Institute of High Molecular Compounds of the Russian Academy of Sciences] Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2039092, (1990).

10. Barvinskij I. A., Barvinskaya I. E. Problemy lit'ja pod davleniem izdelij iz termoplastichnyh materialov [Problems of injection molding of products made of thermoplastic materials] / Polimernye materialy: izdelija, oborudovanie, tehnologii. Moscow, Izdatel'skij dom Otrasleyve vedomosti, 2009, no. 7, pp 25-33.

11. Berliner M. A. Avtomaticheskoe upravlenie processami sushki [Automatic control of drying processes, Automation of drying processes in industry and agriculture], Moscow, Mashgiz, 1963, no 8, pp 8-22.

12. Goncharov D.V., Ivashchuk O.A., Dolgikh E.A. Goncharova I.I. Razrabotka in formacionnoj sistemy dlja modelirovanija i vizualizacii rosta sel'skohozjajstvennyh kul'tur v uslovijah izmenenija klimata [Development of an information system for modeling and visualizing crop growth under climate change conditions], Vestnik GGNTU. Tehnicheskie nauki. Vol XIX, 2023, no.4, pp. 5-14. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.46.48.006.

13. Kalinin V.A., Kurepin V.I., Sposob opredelenija koeficienta teplootdachi tverdyh tel [A method for determining the heat transfer coefficient of solids] Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 93042904/25 (1995).

14. Zhornik M. N. Sposob opredelenija koeficienta teplootdachi [Method for determining the heat transfer coefficient], Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 93042904 (2003).

15. Sapozhnikov V. M., Nagoga G. P.; Sapozhnikov V. M., Nagoga G. P., Sposob opredelenija koeficienta teplootdachi ot poverhnosti konvektivno ohlazhdaemyh jelementov [Method for determining the coefficient of heat transfer from the surface of convectively cooled elements] Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 1044149 (2005).

16. Boltenko E. A., Sudnitsyn O.A.; Boltenko E.A., Sudnitsyn O.A., Ustrojstvomdlja opredelenija koeficienta teplootdachi [Device for determining the heat transfer coefficient] Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 1559860 (1997).

Об авторе

Фарзалиев Эмиль Физули-Оглы (Иркутск, Российская Федерация) – старший преподаватель кафедры «Автоматизация производственных процессов» Иркутского государственного университета путей сообщения (664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15; e-mail: dsd.emka@yandex.ru).

About the author

Farzaliev Emil Fuzuli-Ogly (Irkutsk, Russian Federation) – Senior Lecturer at the Department of Automation of Production Processes of Irkutsk State University of Railway Engineering (15, Chernyshevsky str., Irkutsk, 664074; e-mail: dsd.emka@yandex.ru).

Поступила: 11.06.2024

Одобрена: 05.08.2024

Принята к публикации: 16.09.2024

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Вклад автора 100 %.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Фарзалиев, Э.Ф. Расчет коэффициента теплоотдачи полимерного композита / Э.Ф. Фарзалиев // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2024. – № 3. – С. 154–165.

Please cite this article in English as:

Farzaliev E.F. Calculation of the heat transfer coefficient of a polymer composite. *Bulletin of PNRPU. Chemical Technology and Biotechnology*, 2024, no. 3, pp. 154-165 (In Russ).