

17. Radchenko V.P., Saushkin M.N. Creep and relaxation of residual stresses in strengthened structures. M.: Mashinostroenie, 2005. 226 p.
18. Del' G.D. Determination of stresses in the plastic region by hardness distribution. M.: Mashinostroenie, 1971. 247 p.
19. Zhongxu X., Changpeng C. Study of residual stress in selective laser melting of Ti6Al4V // Materials & Design. 2020. V. 193. Art. 108846.
20. Rossini N.S., Dassisti M., Benyounis K.Y., Olabi A.G. Methods of measuring residual stresses in components (Review) // Materials and Design. 2012. № 35. P. 572-588.
21. Schajer G.S. Residual Stresses: Measurement by Destructive Methods // Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Oxford: Elsevier Science, 2001. Section 5a. P 8152-8158.
22. Schajer G.S., Philip S.W. Hole-Drilling Method for Measuring Residual Stresses // Synthesis SEM Lectures on Experimental Mechanics. 2018. № 1. P. 1-186.
23. Botvenko S.I. Method for determining residual quenching stresses: pat. RF № 494359 C1, MPK G01L1/00; zayavl. 02.10.2012; opubl. 27.09.2013.
24. Hryanin V.N., Bezborodov I.A., Popov M.A., Pchel'nikov A.V., Voloboj E.A. Method for determining residual stresses in coatings: pat. RF № 2757405, MPK G01N3/24; zayavl. 12.03.2020; opubl.10.15.2021.
25. Byakova A.V., Gorbach V.G., Vlasov A.A., Grushevskij YA.L. Method for determining residual stresses: pat. RF № 2032162 C1; zayavl. 10.11.1991; opubl. 27.03.1995.
26. Kolmogorov G.L., Mel'nikova T.E., Kurapova N.A., Konoplev A.V., Kamenev S.A. Method for determining residual stresses in axisymmetric products: pat RF № 2125252, MPK G01L1/00; zayavl. 27.02.1997; opubl. 20.01.1999.
27. Website of the Irkutsk National Research Technical University [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.istu.edu/oborudovanie/element/48185/> (data obrashcheniya: 23.09.2023).
28. Ivanov S.YU., Vasil'kov D.V., Gutner A.B., Vasil'kov S.D., Burakov A.I. Device for non-destructive determination of mechanical stresses in the surface layer of products made of metals and alloys: pat. RF № 64755, MPK G01B7/06; zayavl. 06.09.2006; opubl. 20.06.2008.
29. Website of the Irkutsk National Research Technical University [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.istu.edu/oborudovanie/element/46057/> (data obrashcheniya: 23.09.2023).
30. Kargapol'cev S.K., Gozbenko V.E., Bol'shakov R.S. Method for assessing residual stresses in workpieces made of aluminum alloys // Sovremennye aviacionnye tekhnologii. International Conference on Aviation Engineering: materialy XVI Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (3-7 iyulya 2023 g.). Irkutsk: IRNITU, 2023. P. 86-91.

УДК 621.8, 621.2.082.18

DOI: 10.18324/2077-5415-2023-4-32-37

Математическое моделирование технологического процесса пропитки полиамидных деталей маслом

В.С. Бычковский

Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского, 15, Иркутск, Россия

bikovskii_vs@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5831-3216>

Статья поступила 23.08.2023, принята 23.10.2023

Существуют различные технологические процессы, связанные с пропиткой полимерных и композиционных материалов для различных задач, одним из примеров таких технологий является повышение эксплуатационных характеристик полиамидных деталей путем их пропитки моторными маслами. Данные технологии имеют существенный недостаток, а именно в определении момента достижения наполненного состояния или же конкретно для повышения износостойкости полиамидной детали из ПАБ по технологии пропитки моторным маслом, определения момента достижения пропитки масляного наполнителя на заданную глубину. В связи с этим возникает необходимость в определении скорости движения математической модели пропитки полиамидных деталей маслом. Для достижения данной цели проанализирован сам физический процесс влагопоглощения полимеров для обоснования возможности пропитки их маслом. Рассмотрена математическая модель капиллярной пропитки по закону фильтрации пористой среды, описываемой системой уравнений неразрывности и закона Дарси. Анализ данной математической модели позволил выявить линейный закон изменения разности давления, исходя из этого, была выдвинута гипотеза с последующим ее доказательством, благодаря проведенным численным расчетам и проведенным экспериментам для случая пропитки полиамидного образца размерами 4x50x50 мм моторным маслом М-8В по выявлению линейного закона изменения температуры. Данная гипотеза заключается в замене линейного закона изменения разности давления в системе уравнений на закономерность линейного изменения температуры с учетом поправочного коэффициента. Итогом данной работы стала сформулированная собственная математическая модель пропитки полиамидных материалов моторным маслом с целью определения скорости для обеспечения проникновения масляного наполнителя на заданную глубину. Основным преимуществом математической модели является ее рашение благодаря наиболее доступной методике определения разности температуры полиамидного образца при пропитке снизу-вверх.

Ключевые слова: математическая модель; технологический процесс; закон Дарси; программный комплекс; маслonaполнение полиамида; полиамид-6.

Mathematical modeling of the technological process of impregnation of polyamide parts with oil

V.S. Bychkovsky

Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia

bikovskii_vs@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5831-3216>

Received 23.08.2014, accepted 23.10.2023

There are various technological processes associated with the impregnation of polymer and composite materials for various tasks. One of the examples of such technologies is to improve the performance of polyamide parts by impregnating them with motor oils. For these technologies, there is a significant drawback, namely, in determining the moment when the filled state is reached, or specifically to increase the wear resistance of a polyamide part made of PA6 using the engine oil impregnation technology, determining the moment when the oil filler is impregnated to a given depth. In this regard, there is a need to determine the speed of movement of the oil filler in the body of the finished polymer part. Therefore, the purpose of this work is to develop a mathematical model of impregnation of polyamide parts with oil. To achieve this goal, the physical process of moisture absorption of polymers is analyzed to justify the possibility of impregnating them with oil. A mathematical model of capillary impregnation according to the filtration law of a porous medium described by a system of continuity equations and Darcy's law is considered. The analysis of this mathematical model makes it possible to identify the linear law of the pressure difference change, based on this, a hypothesis is put forward with its subsequent proof thanks to numerical calculations and experiments conducted for the case of impregnation of a polyamide sample with dimensions of 4x50x50 mm with M-8V engine oil to identify the linear law of temperature change. This hypothesis consists in replacing the linear law of pressure difference change in the system of equations with the regularity of linear temperature change taking into account the correction factor. The result of this work was the formulation of our own mathematical model of impregnation of polyamide materials with motor oil in order to determine the speed to ensure penetration of the oil filler to a given depth. The main advantage of the mathematical model is its expansion due to the most accessible methodology for determining the temperature difference of a polyamide sample when impregnated from the bottom up.

Keywords: mathematical model; technological process; Darcy's law; software package; polyamide oil filling; polyamide-6.

Введение. В связи с тем, что уже ранее велась разработка технологического процесса маслonaполнения полиамидных материалов, основная цель которых направлена на повышение эксплуатационных характеристик уже готовых полиамидных деталей для трущихся узлов машин, работающих в сложных условиях с присутствием пыли и загрязнений без жидкостной смазки [1; 2]. Исходя из проведения данных работ выявилась необходимость в способе определения скорости пропитки полиамидных деталей маслом с целью обеспечения проникновения наполнителя на заданную ее глубину, которая будет выше допустимого износа. Для этого возникает цель по составлению математической модели пропитки маслом полиамидного материала.

Пропитка полимерных материалов основана на достаточно сложных процессах, протекающих в полимере. В зависимости от материала наполнения, в качестве преобладающих могут выступать различные виды проникновения, подчиняющиеся различным законам. Чаще всего в качестве наполнителей рассматриваются жидкие материалы, в том числе вода (гигроскопичность полимера до 10 %) и различные виды углеводородов, выступающих как растворителями, так и материалами, изменяющими физико-механические свойства полимерных и композитных изделий [3–5]. Исходя из этого, целью данного исследования является разработка математической модели электротермического маслonaполнения полиамидных деталей.

Материалы и методы исследования. Для достижения цели математического моделирования процесса маслonaполнения необходимо определиться с физикой происходящих процессов. Рассматриваемые нами полиамидные материалы относятся к гидрофильным [6] и впитывают до 10 % жидкости. С другой стороны, технические условия ТУ2224-036-00203803-2012 на полиамиды-6 предусматривают наличие пор в данном материале размерами от 0,8 до 1,5 мм. При этом в работе [7] указано, что полиамиды при взаимодействии с окружающей средой собирают жидкости в аморфных областях полиамида. Объем

аморфных фаз для полиамида могут составлять от 30 до 60 %. Проблемы, возникающие с абсорбцией полиамидов широко известны.

Принимая во внимание исследование образцов размерами 4x50x50 мм, большой площади и малой глубиной проникновения жидкости (изменение поверхностного слоя), процесс маслonaполнения можно рассматривать в виде однонаправленного капиллярного явления (рис. 1).

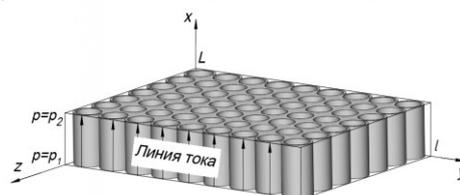


Рис. 1. Модель технологической системы пропитки

В работах ряда авторов широко представлены математические модели, описывающие капиллярные явления с использованием закона фильтрации в пористых средах описываемых системой уравнений неразрывности и закона Дарси (1):

$$\begin{cases} \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \\ u_x = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad u_y = u_z = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Для случая близкого к процессу ВЧ-сушки [8 - 11] математическая модель имеет следующие граничные условия и допущения, представленные ниже.

Боковые границы области, в связи с незначительной высотой образца можно считать непроницаемыми. На входе области задано постоянное давление $x=0$, $p=p_1$, на выходе $x=L$ - задано постоянное давление $p=p_2 < p_1$. Массовые силы отсутствуют. Изменения разности давления подчиняется линейному закону.

Граничными условия являются: $x=0$: $p=p_1$; $x=L$: $p=p_2$.

Далее необходимо определить по какой зависимости изменяется давление. Для этого рассмотрим уравнение (1). В данном уравнении можно исключить скорость пропитки u_x (2):

$$\frac{d^2 p}{dx^2} = 0 \quad (2)$$

Выполнив интегрирование по координате x определим первую константу (3):

$$\frac{dp}{dx} = C_1, \quad (3)$$

Еще раз проинтегрировав, при этом выразив давление получим (4)

$$p = C_1 x + C_2. \quad (4)$$

Исходя из принятых граничных условий определим константы интегрирования (5):

$$C_1 = \frac{p_2 - p_1}{L}, C_2 = p_1 \quad (5)$$

В итоге получим, что в случае плоскопараллельной пропитки давление изменяется по линейному закону (6):

$$p(x) = p_1 + \frac{p_2 - p_1}{L} x \quad (6)$$

Рассмотрев данную модель заполнения (1), несложно отметить и присущие ей сложности применения ее для практического использования в технологии заполнения. Сложность заключается в том, что в производственных условиях не всегда возможно определить разницу давления на границах пористого материала полимера. Необходимо также принять во внимание, что изделия из полимерных

материалов, как правило, используются с основной целью — понижение веса изделия. Достижения данных требований возможно при создании геометрически-сложных конструкций, предусматривающих различные окна, ребра жесткости, сборочные замки, перемычки и т. д.

Поэтому была выдвинута гипотеза о возможности замены в существующей математической модели Дарси, сложным контролируемым параметром разности давления, показателем разности температур при охлаждении образца. Общеизвестным фактом является то, что технологические процессы наполнения полимеров сопровождаются совокупностью операций нагрева, выдержки и охлаждения. Падение температуры также происходит вследствие проникновения в него жидкости, отличающейся своей температурой нагрева. Для определения зависимости температуры от высоты подъема жидкости необходимо выполнить численный расчет и экспериментальное исследование.

Результаты. Для того, чтобы определить закономерность изменения температуры полимерного образца от высоты прохождения наполнителя сквозь него, выполнен в программном комплексе *Solidworks Flow Simulation 2020* численный математический расчет теплообмена полимерного образца ПА6, размерами 4x50x50 мм, с моторным маслом М-8В при маслонеполнении. Выполнение данного расчета стало возможным благодаря функции программного комплекса «Пористая среда». Схема для численного расчета с указанием расположения условных точек термодатчиков по высоте образца представлена на рис. 2.

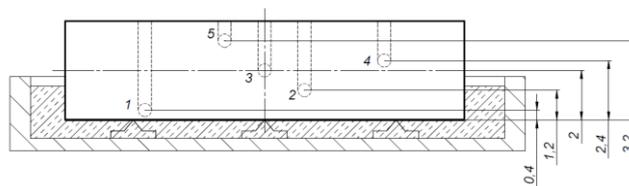


Рис. 2. Схема для численного расчета. Компоненты схемы: 1...5 — высота расположения условных термодатчиков; 6 — образец 4x50x50 мм; 7 — ванна; 8 — масло; 9 — проставки

Граничными условиями для выполнения численного расчета являются: скорость на входе 0,00073 м/с, экспериментально определенная по разработанной методике определения наполненного состояния [12; 13]; статическое давление на

выходе 101 325 Па; температура пористого каркаса 75 °С; температура масла 20,05 °С.

Для поставленной задачи заданы параметры пористого материала образца из ПА6 и представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры пористого материала для ПА6

Свойство	Значение
Пористость	0,0027
Тип проницаемости	Однонаправленная
Форма задания сопротивления	Зависимость от характерного размера пор и Рейнольдса
$f(\text{Re})$	0,177
Условие	Теплопроводность пористого каркаса
Плотность пористого каркаса, $\text{кг}/\text{м}^3$	1 120
Тип проводимости	Изотропная
Температура плавления, K	493,15
Теплообмен между пористым каркасом и текучей средой	Объемный коэффициент теплообмена
Объемный коэффициент теплообмена, $\text{Вм}/(\text{м}^3 \cdot K)$	4 500

Примечание: удельная теплоемкость Дж/(кг·К) и коэффициент теплопроводности Вт/(м·К), зависящие от температуры пористого каркаса, взяты из справочных данных для плотности 1 120 $\text{кг}/\text{м}^3$ [14]. Параметры моторного масла М-8В взяты из ранее опубликованной работы [15].

В процессе приближения к реальным условиям проницаемость среды задана однонаправленной, моделиро-

вание можно представить потоком текучей среды снизу-вверх через множество вертикальных параллельных тонких трубок (капилляров), с большим отношением длины к диаметру, расположенных плотно друг к другу [16; 17]. Данное допущение соответствует модели технологической системы пропитки (рис. 1).

Результат расчета представлен в виде картины темпера-

турного спектра в сечении по плоскости симметрии и направлении пропитки масла (ось x) на рис. 3. По произведенному

численному расчету в программном комплексе физическое время процесса составило 30 с.

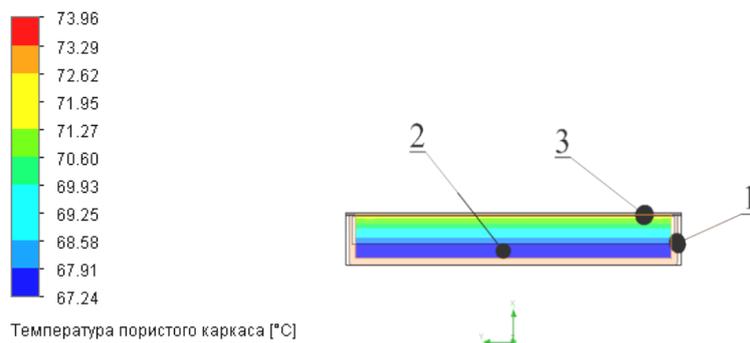


Рис. 3. Картина температурного спектра в сечении по плоскости симметрии ванны: Т1...Т5 — термодатчики; 1 — ванна; 2 — масляный наполнитель; 3 — образец

Результаты численного расчета по определению температуры охлаждения полиамидного образца при прохождении в нем жидкости в снизу-вверх через заданные точки, полученные автоматически в программном комплексе, представлены на рис. 4. Из графических данных видно, что по мере поступления масла в полимер (пористый каркас) его остывание происходит практически линейно по времени.

образца от времени при течении в нем наполнителя

Далее необходимо определить зависимость охлаждения образца от высоты подъема наполнителя в нем. Для этого с применением функции программного обеспечения загрузки момента физического времени пропитки были найдены те моменты времени, при которых масло достигло определенной координаты точки условного термодатчика.

После чего по полученным результатам выполнен расчет температуры образца в координате через момент времени проникновения масла из прямолинейной зависимости остывания образца по времени через уравнение, полученное с помощью аппроксимации с достоверностью 0,9991.

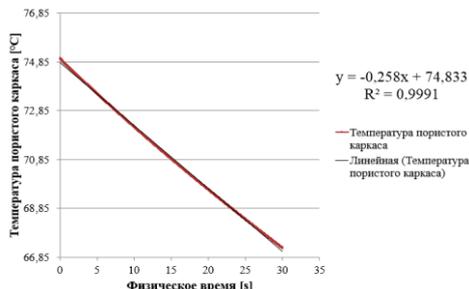


Рис. 4. Зависимость температуры полиамидного

Таблица 2. Результаты по определению момента времени достижения маслом определенной координаты

Обозначение	Высота, x , мм	Время, c	Температура, $^{\circ}C$
T1	0,4	4	73,8
T2	1,2	11	72
T3	2	17	70,4
T4	2,4	20	69,7
T5	3,6	28	67,6

Исходя из определенного момента достижения маслом определенной координаты и определение температуры полиамидного образца в этот же момент построена зависимость на рис. 5.

зависимости температуры образца от высоты подъема масло в нем позволило выявить уравнение прямой линии (8):

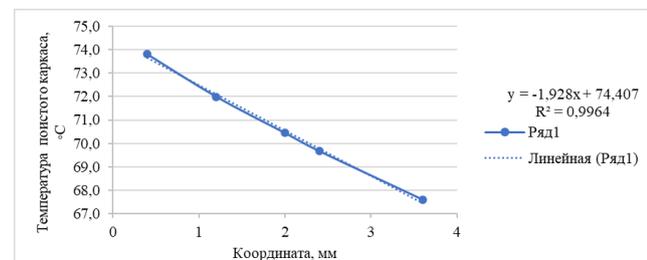


Рис. 5. Результат численного расчета зависимости остывания образца от подъема наполнителя в нем

Из полученных данных видно, что зависимость температуры полиамидного образца по координатам при течении в нем наполнителя подчиняется линейному закону, и величина достоверности аппроксимации составила 0,9964, что является очень близким к единице, прямой линии.

При проведении аппроксимации полученных результатов

$$T(t) = -0,258t + 74,833 \quad (7)$$

где T — температура пористого каркаса, $^{\circ}C$; t — момент времени достижения масла координаты условного термодатчика, c .
Полученные результаты представлены в табл. 2.

Полученные результаты представлены в табл. 2.

Таким образом, становится очевидным, что процесс контроля заполнения маслом пористого материала, на примере полиамида марки ПА6, по температуре T его остывания схож с законом заполнения маслом определяемом моделью Дарси (1) в котором контроль проникновения определяется по разнице давления на границах материала (6).
Для экспериментального подтверждения, обоснования упрощения и применимости данной математической модели на производстве были проведены экспериментальные исследования. Для этого была разработана экспериментальная автоматизированная установка на базе ВЧ-оборудования модели УЗП-2500 [18; 19]. Причем процесс нагрева сопровождался ВЧ-сушкой, что обеспечивало гарантированное соблюдение условий однофазного заполнения пористого материала.

Эксперимент проводился с использованием полиамида марки ПА-6 и моторного масла М8-в смеси с гексаном, что соответствовало условиям, предъявляемым к составу стандартной рабочей жидкости (СРЖ). Параметры проведенного эксперимента: образец размером 4x50x50 мм, гексана 40 %,

масла 60 %, температура наполнения составляла 50 °С [2; 20].

Автоматизированный эксперимент, проведенный в рамках настоящей работы, позволил определить зависимость остывания образца в координатах и во времени по разработанной ранее методике объемного контроля температуры [12]. Данные охлаждения представлены на рис. 6.

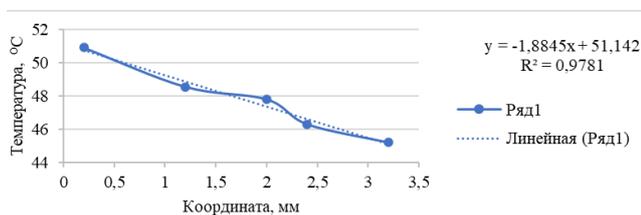


Рис. 6. Результат экспериментального определения зависимости остывания образца от подъема наполнителя в нем

Полученные результаты также подтверждают, что зависимость температуры охлаждения полиамидного образца от координаты подъема жидкости при пропитке подчиняется линейному закону.

Выводы. Из проведенного численного расчета и эксперимента обосновывается гипотеза о возможности замены в существующей математической модели Дарси, разности давления, показателем разности температур при охлаждении образца, так как оба эти параметра разности имеют линейную зависимость с пересчетом на модуль коэффициента. Уравнение неразрывности и закон Дарси может быть описана математической моделью в следующем виде (9):

$$\begin{cases} \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \\ u_x = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial T}{\partial x} \cdot K_u, \quad u_y = u_z = 0 \end{cases} \quad (9)$$

Для данного настоящего исследования при заданных условий течения жидкости по одной координате система уравнений примет вид (10)

$$\begin{cases} \frac{\partial u_x}{\partial x} = 0 \\ u_x = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial T}{\partial x} \cdot K_u \end{cases} \quad (10)$$

Анализ разработанной математической модели

Литература

1. Бычковский В.С., Филиппенко Н.Г., Попов С.И., Попов А.С. Термовакuumное нанесение самосмазывающихся покрытий полимерных материалов узлов трения машин и механизмов транспортного машиностроения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2018. № 2 (58). С. 58-64.
2. Буторин Д.В., Чукай И.В., Филиппенко Н.Г. Технология маслonaполнения полимерных и композитных антифрикционных материалов // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы Седьмой междунар. науч.-практической конф., посвящ. 355-летию со дня основания г. Иркутска (29 марта - 01 апр. 2016 г.) Иркутск, 2016. Т. 2. № 2. С. 490-495.
3. Нельсон У.Е. Технология пластмасс на основе полиамидов / пер. с англ. С.Г. Куличихина, Р.З. Маркович. М.: Изд-во «Химия». 1979. 256 с.
4. Филиппенко Н.Г., Беломестных А.А., Чумбадзе Т.Т. Автоматизированное исследование процесса набухания уплотнений сливных приборов вагонов-цистерн // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 2 (70). С. 62-68.
5. Петрова П.Н., Федоров А.Л. Исследование механизмов формирования износостойких маслonaполненных композитов на основе политетрафторэтилена, полученных путем пропитки пористых заготовок // Вестн. Северо-Восточного федер. ун-та им. М.К. Аммосова. 2010. Т. 7. № 4. С. 52-58.

показывает, что полученные значения dP/dx отличаются от dT/dx на модуль коэффициента K_u .

При использовании в качестве испытуемого образца материала полиамид ПА6 при пропитке маслом, полученная зависимость охлаждения образца (рис. 5) представлена в следующем виде (11):

$$T(x) = -1,928x + 74,407. \quad (11)$$

Для определения коэффициента K_u скорость изменения температуры была продифференцирована от координаты x , что позволило определить искомым коэффициент в виде скорости изменения температуры:

$$K_u = -1,928.$$

Необходимо отметить, что коэффициент K_u определяется заранее для заданных условий эксперимента, материала и состава СРЖ.

Заключение. В ходе проведенных работ подтверждена выдвинутая гипотеза о прямолинейной зависимости температуры от высоты подъема жидкости при выполнении технологического процесса электротермического маслonaполнения полиамидного изделия благодаря выполненному численному расчету, с применением программного обеспечения с последующим экспериментальным подтверждением данной зависимости.

Таким образом, выдвинутая гипотеза о возможности организации технологической операции контроля заполнения полимерных материалов по температуре подтверждается и не противоречит уравнению неразрывности и закону Дарси.

Данная математическая модель (10) может быть решена аналитически или же экспериментально по разработанной методике, что легко применимо для практического ее использования при технологической подготовке производства.

Исходя из этого, достигнута цель настоящего исследования, обоснована применимость математической модели пропитки полимерного изделия из материала ПА6 при электротермическом маслonaполнении. Полученные результаты применимы для разработки технологии повышения эксплуатационных характеристик полиамидных деталей. Данная технология перспективна в сфере железнодорожного транспорта для узлов трения, работающих в сложных условиях, в присутствии загрязнений и в отсутствие внешней жидкостной или густой смазки.

6. Marco Laurati, Sotta P., Didier Long, Louise-Anne Fillot, Arantxa Arbe, Alegria A.A., Jan Peter Embs, Unruh T., Schneider G.J., Juan Colmenero. Dynamics of Water Absorbed in Polyamides // Macromolecules. 2012. 45 (3). P. 1676-1687.
7. Varun Venoor, Jay Hoon Park, David Kazmer, Margaret J. Sobkowicz. Understanding the Effect of Water in Polyamides: A Review // December 2020 Polymer Reviews. 2020. 61 (3). P. 1-49.
8. Butorin D.V. Automation of the process of control of states of polymer materials at electrothermal treatment // Article Scopus. VI International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway. conference proceedings. 2018. P. 306-309.
9. Filippenko N.G. Research of high-frequency influence on polymeric materials of rolling stock products // Article Scopus. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019. P. 1012-1021.
10. Livshits A.V. Mathematical modeling of the processes of the high-frequency heating of thermoplasts and quality improvement of welded polymeric items // Article Scopus. JP Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. V. 2. № 14. P. 219-226.
11. Butorin D.V., Filippenko N.G., Bakanin D.V., Bychkovsky V.S., Larchenko A.G., Livshits A.V. Mathematical modeling of electrothermal processes using the example of high-frequency welding of a batch of symmetric polymer workpieces // Article Scopus. Journal of physics: Conference series. International scientific conference energy management

- of municipal facilities and sustainable energy technologies - 2020. P. 1012-1052.
12. Бычковский В.С., Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В., Баканин Д.В., Фарзалиев Э.Ф. Автоматизированный способ контроля наполнения маслом полимерных и композиционных материалов // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Т. 68. № 4 (45). С. 9-16.
 13. Bychkovsky V., Butorin D., Bakanin D., Filippenko N., Kuraitis A., Larchenko A. Contact method of volume control of temperature of a polymer sample at high-frequency heating // Article Scopus. Journal of physics: conference series. International scientific conference energy management of municipal facilities and sustainable energy technologies, 2020. P. 123-158.
 14. Пивень А.Н., Гречаная Н.А., Чернобыльский И.И. Теплофизические свойства полимерных материалов: справ. Киев: Изд-во «Вища школа», 1976. 180 с.
 15. Бычковский В.С., Баканин Д.В., Курайтис А.С., Филиппенко Н.Г. Исследование автоматизированного процесса высоко-частотного маслonaполнения полимерного материала ПА6 моторным маслом М-8в в целях повышения эксплуатационных свойств деталей, применяемых на транспорте // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2020. № 4 (68). С. 49-58.
 16. Jamol Makhmudov, Azizbek Usmonov, Jakhongir Kuljonov. Solution of the Anomalous Filtration Problem in Two-Dimensional Porous Media // In book: Current Problems in Applied Mathematics and Computer Science and Systems June, 2023. P. 68-80.
 17. Arvind Kumar, Hardik Kothadia. Experimental Investigation of Two-Phase Pressure Drop in the Straight Adiabatic Tubes // January 2023 Multiphase Science and Technology. 2023. № 35 (1).
 18. Butorin D.V., Filippenko N.G., Livshits A.V., Popov S.I. Analysis of failures of bearings of axle box unit with polyamide cages and prospects of increasing their service life // Article Scopus. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans - 2019. P. 1001-1010.
 19. Бычковский В.С., Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В., Баканин Д.В., Фарзалиев Э.Ф. Сравнительный анализ физико-эксплуатационных характеристик полимерных образцов, наполненных маслом // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69. № 2 (47). С. 91-96.
 20. Chumbadze T.T., Filippenko N.G., Farzaliev E.F., Livshits A.V., Bychkovsky V.S. Research aspects of modeling and automated process control photopolymerization // Article Scopus. Journal of physics: conference series. Volume 2094. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2021. P. 152-158.
- References*
1. Bychkovskij V.S., Filippenko N.G., Popov S.I., Popov A.S. Thermal vacuum application of self-lubricating coatings of polymer materials of friction units of machines and mechanisms of transport engineering // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2018. № 2 (58). P. 58-64.
 2. Butorin D.V., Chuklaj I.V., Filippenko N.G. Technology of oil filling of antifriction polymer and composite materials: materialy Sed'moj mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf., posvyashch. 355-letiyu so dnya osnovaniya g. Irkutsk (29 marta - 01 apr. 2016 g.) Irkutsk, 2016. V. 2. № 2. P. 490-495.
 3. Nel'son U.E. Technology of plastics based on polyamides / per. s angl. S.G. Kulichihina, R.Z. Markovich. M.: Izd-vo «Himiya». 1979. 256 p.
 4. Filippenko N.G., Belomestnyh A.A., Chumbadze T.T. Automated investigation of the swelling process of seals of drain devices of tank cars // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2021. № 2 (70). P. 62-68.
 5. Petrova P.N., Fedorov A.L. Investigation of the mechanisms of formation of wear-resistant oil-filled composites based on polytetrafluoroethylene obtained by impregnation of porous blanks // Herald of the NEFU named after M.K. Ammosov. 2010. V. 7. № 4. P. 52-58.
 6. Marco Laurati, Sotta P., Didier Long, Louise-Anne Fillot, Arantxa Arbe, Alegria A.A., Jan Peter Embs, Unruh T., Schneider G.J., Juan Colmenero. Dynamics of Water Absorbed in Polyamides // Macromolecules. 2012. 45 (3). P. 1676-1687.
 7. Varun Venoor, Jay Hoon Park, David Kazmer, Margaret J. Sobkovicz. Understanding the Effect of Water in Polyamides: A Review // December 2020 Polymer Reviews. 2020. 61 (3). P. 1-49.
 8. Butorin D.V. Automation of the process of control of states of polymer materials at electrothermal treatment // Article Scopus. VI International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway. conference proceedings. 2018. P. 306-309.
 9. Filippenko N.G. Research of high-frequency influence on polymeric materials of rolling stock products // Article Scopus. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans 2019. P. 1012-1021.
 10. Livshits A.V. Mathematical modeling of the processes of the high-frequency heating of thermoplasts and quality improvement of welded polymeric items // Article Scopus. JP Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. V. 2. № 14. P. 219-226.
 11. Butorin D.V., Filippenko N.G., Bakanin D.V., Bychkovsky V.S., Larchenko A.G., Livshits A.V. Mathematical modeling of electrothermal processes using the example of high-frequency welding of a batch of symmetric polymer workpieces // Article Scopus. Journal of physics: Conference series. International scientific conference energy management of municipal facilities and sustainable energy technologies - 2020. P. 1012-1052.
 12. Bychkovskij V.S., Filippenko N.G., Livshic A.V., Bakanin D.V., Farzaliev E.F. Automated method of oil filling control of polymer and composite materials // Electrical technology and equipment in the agro-industrial complex. 2021. V. 68. № 4 (45). P. 9-16.
 13. Bychkovsky V., Butorin D., Bakanin D., Filippenko N., Kuraitis A., Larchenko A. Contact method of volume control of temperature of a polymer sample at high-frequency heating // Article Scopus. Journal of physics: conference series. International scientific conference energy management of municipal facilities and sustainable energy technologies, 2020. P. 123-158.
 14. Piven' A.N., Grechanaya N.A., Chernobyl'skij I.I. Thermophysical properties of polymer materials: sprav. Kiev: Izd-vo «Vishcha shkola», 1976. 180 p.
 15. Bychkovskij V.S., Bakanin D.V., Kurajtis A.S., Filippenko N.G. Investigation of the automated process of high-frequency oil filling of polymer material PA6 with M-8v motor oil in order to improve the operational properties of parts used in transport // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2020. № 4 (68). P. 49-58.
 16. Jamol Makhmudov, Azizbek Usmonov, Jakhongir Kuljonov. Solution of the Anomalous Filtration Problem in Two-Dimensional Porous Media // In book: Current Problems in Applied Mathematics and Computer Science and Systems June, 2023. P. 68-80.
 17. Arvind Kumar, Hardik Kothadia. Experimental Investigation of Two-Phase Pressure Drop in the Straight Adiabatic Tubes // January 2023 Multiphase Science and Technology. 2023. № 35 (1).
 18. Butorin D.V., Filippenko N.G., Livshits A.V., Popov S.I. Analysis of failures of bearings of axle box unit with polyamide cages and prospects of increasing their service life // Article Scopus. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region, SibTrans - 2019. P. 1001-1010.
 19. Bychkovskij V.S., Filippenko N.G., Livshic A.V., Bakanin D.V., Farzaliev E.F.O. Comparative analysis of physical and operational characteristics of polymer samples filled with oil // Electrical technology and equipment in the agro-industrial complex. 2022. V. 69. № 2 (47). P. 91-96.
 20. Chumbadze T.T., Filippenko N.G., Farzaliev E.F., Livshits A.V., Bychkovsky V.S. Research aspects of modeling and automated process control photopolymerization // Article Scopus. Journal of physics: conference series. Volume 2094. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2021. P. 152-158.