

УДК 679.7

DOI: 10.15593/2224-9397/2020.4.09

Е.С. Гольцов, И.Я. Дятлов, Н.М. ТруфановаПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА
ПРИ СИЛАНОВОЙ СШИВКЕ В ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СРЕДЕ
«ВОДА–ГАЗ» С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛИ VOLUME OF FLUID**

Полиэтилен (ПЭ), термопластичный полимер, отличается способностью к плавке и формовке при повышенных температурах. По этой причине стандартные марки полиэтилена оказываются ограниченными в их применении рамками таких максимальных температур, которые будут значительно ниже, чем температура плавления. За счет сшивания термическая стабильность размеров полиэтилена (РЕХ) может быть существенно повышена. Это обеспечивает возможность для того, чтобы использовать продукты из РЕХ в областях применения с более высокими температурными требованиями, которые превосходят температурные ограничения для нормальных термопластических марок. **Цель исследования:** Создание математической модели процесса тепломассопереноса в ванне для силановой сшивки изоляции кабеля, наполненной горячей водой с непрерывной подачей перегретого пара, определение времени нагрева изоляции. **Методы:** Численная реализация разработанной математической модели осуществлялась методом конечных элементов в среде ANSYS, Fluent. Для описания положения границы раздела пар – воздух используется модель VOF, для описания турбулентного течения привлекается классическая ke-модель. Для построения геометрии и разбиения на сетку конечных элементов использовались препроцессор ICEM CFD и квадратичные элементы. **Результаты:** В работе разработана нестационарная двумерная математическая модель процессов тепломассопереноса в ванне с кабелем и двухкомпонентной средой – пар-вода. Проведен анализ работоспособности предложенной модели. В результате исследования были получены векторное поле скоростей, поля температур и распределения фаз в силанольной ванне. Построена зависимость температуры кабеля, представляющего собой монолит с усредненными свойствами, от времени нагрева в центре монолитной изоляции. Оценена адекватность математической модели и определена возможность её использования на практике. **Практическая значимость:** Результаты данной работы могут быть использоваться при создании технологических режимов сшивки силановой изоляции, при смене конструктивных особенностей заготовки и её длины на барабане. Использование цифровой модели позволяет оценить время протекания процесса силановой сшивки для кабелей среднего напряжения и определить рациональные режимы технологического процесса.

Ключевые слова: модель volume of fluid, силановая сшивка, теплообмен, кабель, вода, пар.

E.S. Goltsov, I.Ya. Djatlov, N.M. Trufanova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

MODELING THE HEAT TRANSFER PROCESS DURING SILANE CROSSLINKING IN A TWO-COMPONENT WATER-GAS MEDIUM USING A VOLUME OF FLUID MODEL

Polyethylene (PE), a thermoplastic polymer, has the ability to melt and form at elevated temperatures. For this reason, standard grades of polyethylene are limited in their application by the limits of such maximum temperatures, which will be significantly lower than the melting point. Due to crosslinking, the thermal dimensional stability of polyethylene (PEX) can be significantly increased. This makes it possible to use PEX products in applications with higher temperature requirements that exceed the temperature limits for normal thermoplastic grades. **Purpose:** creating a mathematical model of the heat and mass transfer process in a bath for silane crosslinking of cable insulation filled with hot water with a continuous supply of superheated steam, determining the heating time of the insulation. **Methods:** Numerical implementation of the developed mathematical model was carried out by the finite element method in the ANSYS, Fluent environment. The VOF model is used to describe the position of the vapor - air interface; the classical ke model is used to describe the turbulent flow. The ICFM CFD pre-processor and quadratic elements were used to construct the geometry and divide it into a grid of finite elements. **Results:** a non - stationary two-dimensional mathematical model of heat and mass transfer processes in a bath with a cable and a two-component medium-steam-water is developed. The efficiency of the proposed model is analyzed. As a result of the study, a vector field of velocities, temperature fields, and phase distributions in a silanol bath were obtained. The dependence of the temperature of the cable, which is a monolith with averaged properties, on the heating time in the center of the monolithic insulation is constructed. The adequacy of the mathematical model is evaluated and the possibility of its use in practice is determined. **Practical significance:** The results of this work can be used when creating technological modes of crosslinking for new insulation, when changing the design features of the workpiece and its length on the drum. Using a digital model allows you to estimate the time of the silane crosslinking process for medium-voltage cables and determine the rational modes of the technological process.

Keywords: volume of fluid model, silane crosslinking, heat exchange, cable, water, steam.

Введение. Кабели с пластмассовой изоляцией из сшитого полиэтилена сегодня получили достаточно широкое распространение, что связано с их термической и механической прочностью.

Одним из методов сшивки полиэтилена является силановый метод. Прививка силана методом сшивания водой состоит из двух этапов, которые также будут проходить последовательно [1–3]. На первой стадии силан прививается через его винильные группы в полиэтилен через инициированную перекисью реакцию свободных радикалов. Следует отметить, что в ходе реакций прививки образуются новые полиэтиленовые радикалы и необходимое количество пероксида относительно низкое.

На второй стадии полученный сополимер сшивается посредством воздействия горячей воды или пара с помощью катализатора [4]. Влага

приводит к гидролизу силана, и после этого эти гидроксильные группы конденсируются с образованием устойчивых силоксановых связей (поперечных связей).

Технологический процесс кабеля с силаносшиваемой изоляцией выглядит следующим образом: на токопроводящую жилу методом экструзии наносится изоляция из силаносшиваемого полиэтилена, затем изолированная жила наматывается на барабан, который на следующем этапе производства помещается в ванну с водой с температурой 90 °С, где выдерживается с заданным промежутком времени. При смене маркоразмеров и длины заготовки меняются масса и время выдержки, которое необходимо определять в каждом конкретном случае. Таким образом, возникает необходимость в разработке математической модели процессов, протекающих при силановой сшивке изоляции, и в определении параметров технологического процесса.

Проблемами, возникающими при указанном технологическом процессе, занимались отечественные и зарубежные авторы. В статье О.И. Пешкова и С.Д. Холодного [5] на основе приближенных инженерных расчетов разработана методика определения времени сшивки изоляции кабеля в изотермическом режиме. Авторами Bengtsson и Oksman в работе [6] были использованы различные экспериментальные способы получения времени силановой сшивки полиэтилена, такие как: дифференциальная сканирующая калориметрия, ИК-спектроскопия с Фурье-преобразованием, электронно-зондовый микроанализатор.

В данной работе рассмотрены процессы теплообмена между теплоносителем и заготовкой. Численная реализация разработанной математической модели осуществлялась методом конечных элементов в среде ANSYS, Fluent. Для описания положения границы раздела «пар–воздух» используется модель VOF; для описания турбулентного течения привлекается классическая ke-модель. Для построения геометрии и разбиения на сетку конечных элементов использовались препроцессор ICEM CFD и квадратичные элементы.

Постановка цели и задач исследования. Цель работы – анализ процессов теплообмена в ванне при силановой сшивке кабеля в двухфазной среде «пар–вода» и определение рациональных параметров технологического процесса.

Для исследования процесса сшивки выбран наиболее используемый в промышленности кабель марки АПвБВ 1×300/6 кВ длиной

500 мм [7]. Использован барабан 12 мс с размерами: длина шейки – 800 мм, диаметр шейки – 650 мм, диаметр щеки – 1220 мм. Используется ванна шириной 2400 мм и высотой 2900 мм, в которой находится горячая вода [8]. Намотанный на барабан кабель заменен монолитным материалом с усредненными теплофизическими свойствами (таблица), полученными с учетом конструктивных особенностей кабеля и барабана [9].

Эквивалентные свойства монолитного материал

Свойства	Плотность, кг/м ³	Удельная теплоёмкость, Дж/кг·°С	Теплопроводность, Вт/м·°С
Величина	1645	2336	79

На рис. 1 приведена геометрия рассматриваемого объекта.

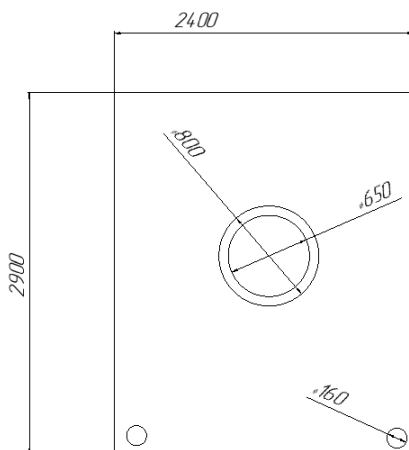


Рис. 1. Параметры используемой модели

Допущения. В процессе создания математической модели процессов теплопереноса были сделаны следующие допущения: течение воды в ванне турбулентное; теплофизические свойства твёрдых материалов постоянны; среда несжимаемая; на границе раздела разнородных сред реализуется условие идеального контакта.

Система уравнений. Двумерная нестационарная математическая модель, описывающая процессы теплообмена с учетом сделанных упрощений для фазы, имеет вид [10]:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) \right] = S_{\alpha q} + \sum_{p=1}^n (m_{pq} - m_{qp}); \quad (1)$$

– уравнение моментов:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t}(\rho v^r)\right) + \nabla(\rho v^r v^r) = -\nabla p + \nabla(\mu(\nabla v^r + \nabla v^{rT}) + \rho g^r + F^r); \quad (2)$$

– уравнение энергии:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t}(\rho E)\right) + \nabla(v(\rho E + p)) = \nabla(k_{eff} \nabla T) + S_h; \quad (3)$$

– уравнение переноса для кинетической энергии турбулентности k :

$$\left(\frac{\partial \rho_i k \bar{v}_{ir}}{\partial r} + \frac{\partial \rho_i k \bar{v}_{iz}}{\partial z}\right) = \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\mu_i + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu_i + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right] + G_k + G_b - \rho_i \varepsilon - Y_m. \quad (4)$$

Уравнение переноса для скорости диссипации кинетической энергии турбулентности ε [11]:

$$\left(\frac{\partial \rho_i \varepsilon \bar{v}_{ir}}{\partial r} + \frac{\partial \rho_i \varepsilon \bar{v}_{iz}}{\partial z}\right) = \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\mu_i + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\mu_i + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + \rho_i C_1 S \varepsilon - \rho_i C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v_i \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b. \quad (5)$$

Отслеживание границы раздела фаз осуществляется путем решения уравнения неразрывности для объемной доли одной фазы (или нескольких) [12].

Граничные условия. Используются следующие граничные условия: на крышке задан выход; на трубах задана скорость выхода пара 0,1 м/с; на правой, левой и нижней стенке задано условие адиабатического теплообмена.

Начальные условия. Начальная температура жилы, изоляции и барабана – 20 °С, температура воды – 90 °С, область ванны заполнена водой.

Используемый метод. Реализация используемой математической модели производилась методом конечных элементов в программном пакете ANSYS [13–15]. Модель volume of fluid (VOF) может моделировать две или более несмешивающиеся жидкости, решая один набор уравнений импульса и отслеживая объемную долю каждой из жидкостей по всей области. Типичные области применения включают предсказание

распада струи, движение крупных пузырьков в жидкости, движение жидкости после прорыва плотины и устойчивое или переходное отслеживание любой границы раздела «жидкость–газ» [16–19].

Полученные результаты. В результате численных расчётов получено распределение температуры в центре монолитной изоляции от времени (рис. 2). Здесь проведено изменение температуры в центре барабана, полученное в статье [20], где средой вулканизации была только вода с температурой 90 °С.

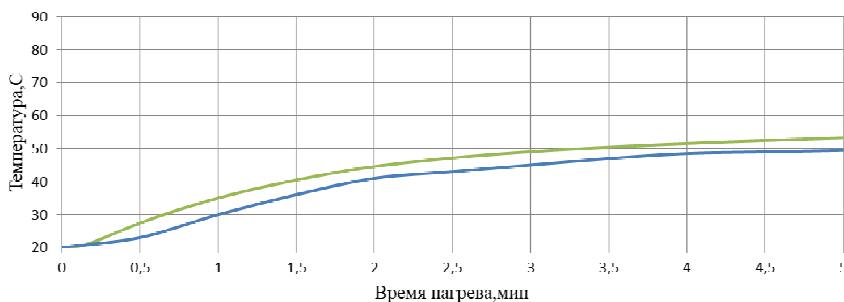


Рис. 2. График зависимости температуры нагрева от времени: синяя линия – исследуемая модель, зелёная линия – модель, полученная в предыдущей статье

Анализируя полученную зависимость, можно сказать, что кривые нагрева имеют идентичный наклон, что свидетельствует о равной скорости нагрева. Кривые нагрева для двух моделей близки, отличие не превышает 14 % в начале нагрева и 6 % в конце, что свидетельствует об адекватности предложенного подхода.

Также рассчитана зависимость температуры нагрева от времени в центре монолитного материала по истечении 30 мин, которая представлена на рис. 3.

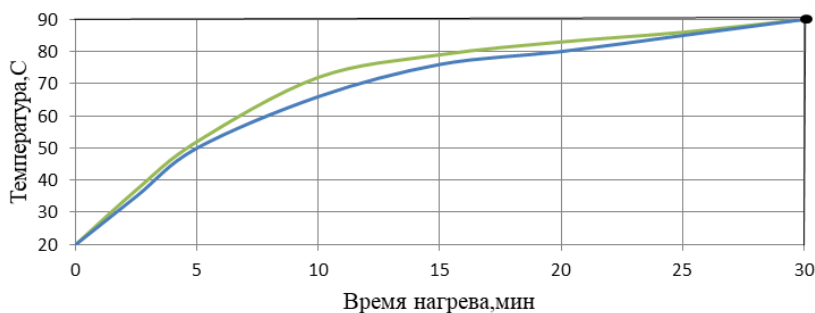


Рис. 3. График зависимости температуры нагрева от времени в центре монолитного материала по истечении 30 мин: синяя линия – исследуемая модель, зелёная линия – модель, полученная в предыдущей статье

Из рис. 3 видно, что кривые нагрева для двух моделей близки, отличие составляет около 8 %. Нагрев материала в ранее полученной статье происходил за счёт теплового нагревателя с температурой 150 °С в отличие от исследуемой модели, в которой нагрев проводился за счёт подачи пара под давлением из паровых труб. Также была получена экспериментальная точка 90 °С, после которой кривая прекратила возрастать и начался линейный участок нагрева, экспериментальное значение совпало с теоретическим, взятым из источника [20].

В результате численного исследования были получены поля распределения фаз «газ–вода» и векторов скорости в ванне (рис. 4), что позволило определить характер процесса нагрева и перемешивания.

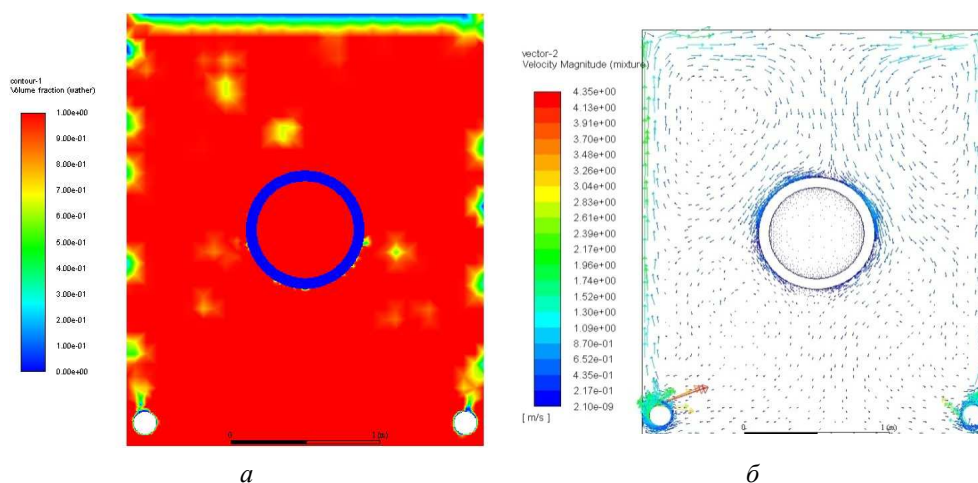


Рис. 4. Результаты численного исследования: *a* – поле распределения фаз; *б* – векторное поле скоростей

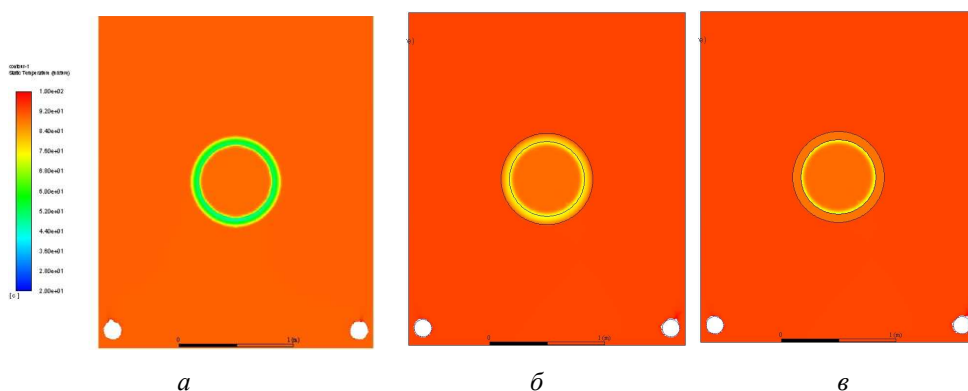


Рис. 5. Температурное поле в ванне: после 5 (*a*), 15 (*б*) и 30 (*в*) мин

Анализируя рис. 4, видно, что из труб под давлением выходит пар. Далее он передвигается в воде в виде пузырьков, таким образом нагревая воду. Пузырьки пара осаждаются на стенке ванны, поскольку пар подаётся по краям ванны, а не по всей площади дна. Анализ поля скоростей позволил определить характер движения сред в ванне, представляющий собой вихревые потоки, приводящие к интенсивному конвективному теплообмену.

На рис. 5. показано поле температур в ванне по истечении 5, 15 и 30 мин нагрева.

Из рис. 5, *а* видно, что после 5 мин нагрева вода в ванне стала теплее на 2 °С, а кабельная конструкция прогрелась до 50 °С, это связано с работой труб, из которых выходит пар с температурой 150 °С. Также на рис. 5, *б* и 5, *в* кабельная заготовка прогрелась на 76 и 90 °С соответственно.

Выводы. Таким образом, в работе была разработана математическая модель процесса тепломассопереноса в ванне между кабелем и двумя средами пар и вода с использованием VOF-модели. Разработанная математическая модель предусматривает возможность изменения параметров заготовки, технологических параметров процесса и геометрических размеров ванны, что позволяет использовать данный подход для различных маркоразмеров кабеля и оптимизировать процесс сшивки в целом.

Анализ полученных распределений температур показал, что кривые нагрева имеют идентичный наклон, что свидетельствует о равной скорости нагрева. И применение модели, учитывающей процессы теплообмена «пар–вода», необязательно. Результаты данной работы могут быть использоваться при создании технологических режимов сшивки силановой изоляции.

Библиографический список

1. Yussuf A., Kosior E., Alban L. Silane grafting and crosslinking of metallocene-catalysed LLDPE and LDPE // *Malaysian Polym.* – 2007. – No. 2. – P. 58–71.
2. Laminating of chemically modified silan based nanosols for advanced functionalization of cotton textiles / A.L. Mohamed, M.E. El-Naggar, T.I. Shaheen, A.G. Hassabo // *International Journal of Biological Macromolecules.* – 2017. – Vol. 95. – P. 429–437.

3. P(4-*vp*) based nanoparticles and composites with dual action as antimicrobial materials / O. Ozay, N. Sahiner, A. Akcali, M.T. Otkun, C. Silan, N. Aktas // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. – 2010. – Vol. 79, № 2. – P. 460–466.

4. Bhagat S.D., Filho E.B.D.S., Stiegman A.E. High refractive index polymer composites synthesized by cross-linking of oxozirconium clusters through thiol-ene polymerization // *Macromolecular Materials and Engineering*. – 2015. – № 6. – P. 580–585.

5. Пешкова О.И., Холодный С.Д. Расчет времени сшивания полиэтиленовой изоляции с применением силанов // *Исследовано в России*. – 2014. – С. 28–32.

6. Bengtsson M., Oksman K. The use of silane technology in cross-linking polyethylene/wood flour composites / Department of Engineering Design and Materials, Norwegian University of Science and Technology, 2005. – P. 752–766.

7. ГОСТ Р 55025-2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.

8. Гольцов Е.С., Дятлов И.Я., Труфанова Н.М. Исследование процесса теплообмена при силановой шшивке // *Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы всерос. науч.-техн. конф.: в 2 т.* – Пермь: Изд-во Перм. нац. исследов. политехн. ун-та, 2019. – Т. 2. – С. 199–203.

9. Бурлаченко О.В., Чеснокова О.Г., Чередниченко Т.Ф. Исследование теплофизических свойств сверхтонкой жидкой теплоизоляции // *Актуальные проблемы строительного и дорожного комплексов: материалы междунар. науч.-техн. конф., посв. 50-лет. Института строительства и архитектуры Поволжского гос. технолог. ун-та.* – Йошкар-Ола, 2019. – С. 199–204.

10. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Управление токовой нагрузкой линий в кабельном канале с учетом сложного теплообмена // *Известия Самар. науч. центра Рос. акад. наук.* – 2012. – Т. 14. – № 4(5). – С. 1318–1321.

11. Костарев Н.А., Труфанова Н.М. Исследование процессов тепломассопереноса в нефтяной скважине с учетом процесса парафинообразования // *Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы всерос. науч.-техн. конф.: в 2 т.* – Пермь, 2017. – Т. 2. – С. 136–142.

12. Теоретическое исследование теплопроводности в многослойном сферическом теле с фазовыми переходами в слоях / В.Е. Мизонов, А.В. Митрофанов, Е.В. Басова, Е.А. Шуина, К. Таннус // Известия высших учебных заведений. Сер. Химия и химическая технология. – 2020. – Т. 63, № 7. – С. 54–60.

13. Li H., Waldman R.M., Hu H. An experimental investigation on unsteady heat transfer and transient icing process upon impingement of water droplets // 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 54th. – 2016.

14. Zhang X., Li Z. Entransy of water vapor and its balance equation for heat and mass transfer process in the absorber // International Heat Transfer Conference. Proceedings of the 16th International Heat Transfer Conference, ИHTC 2018. – 2018. – P. 5795–5802.

15. Transient 3d simulation for heating and melting process of pwr core after sbo / X. Zhang, H. Chen, F. Liu, D. Zhan // Annals of Nuclear Energy. – 2018. – Vol. 115. – P. 256–267.

16. Земляная Н.В., Шаланин В.А. Применение принципа минимума кривизны для расчета форм криволинейных водосливных поверхностей // Вестник инженерной школы Дальневост. федерал. ун-та. – Владивосток, 2019. – № 4.

17. Numerical simulation of multiphase flow in a vanyukov furnace / H.L. Zhang, Y.M. Chen, C.Q. Zhou, W.U. Bing // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – 2015. – No. 5. – P. 457–463.

18. Иванов А.В., Смирнов Ю.Д. Оптимизация работы форсунки пылеподавления с использованием вычислительного моделирования // Записки Горного института. – СПб., 2013.

19. Wang T., Zhao H., Meng T. Analysis of tsunami effect and structural response // Tehnicki Vjesnik. – 2015. – No. 6. – P. 1365–1371.

20. Гольцов Е.С., Дятлов И.Я., Труфанова Н.М. Численный анализ процесса тепломассопереноса при силановой сшивке в водной ванне // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань, 2019. – № 7.

References

1. Yussuf A., Kosior E., Alban L. Silane grafting and crosslinking of metallocene-catalysed LLDPE and LDPE. *Malaysian Polym*, 2007, no. 2, pp. 58-71.

2. Mohamed A.L., El-Naggar M.E., Shaheen T.I., Hassabo A.G. Laminating of chemically modified silan based nanosols for advanced function-

alization of cotton textiles. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, vol. 95, pp. 429-437.

3. Ozay O., Sahiner N., Akcali A., Otkun M.T., Silan C., Aktas N. P(4-vp) based nanoparticles and composites with dual action as antimicrobial materials. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2010, vol. 79, no. 2, pp. 460-466.

4. Bhagat S.D., Filho E.B.D.S., Stiegman A.E. High refractive index polymer composites synthesized by cross-linking of oxozirconium clusters through thiol-ene polymerization. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2015, no. 6, pp. 580-585.

5. Peshkova O.I., Kholodnyi S.D. Raschet vremeni sshivaniia polietilenovoi izoliatsii s primeneniem silanov [Calculation of the crosslinking time of polyethylene insulation using silanes]. *Issledovano v Rossii*, 2014, pp. 28-32.

6. Bengtsson M., Oksman K. The use of silane technology in cross-linking polyethylene/wood flour composites. Department of Engineering Design and Materials, Norwegian University of Science and Technology, 2005, pp. 752-766.

7. GOST R 55025-2012. Kabeli silovye s plastmassovoi izoliatsiei na nominal'noe napriazhenie ot 6 do 35 kV vkliuchitel'no [Power cables with plastic insulation for rated voltage from 6 to 35 kV inclusive]. Dostup iz spravochno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.

8. Gol'tsov E.S., Diatlov I.Ia., Trufanova N.M. Issledovanie protsessa teploobmena pri silanovoi sshivke [Study of the heat exchange process in silane crosslinking]. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii. Materialy vs Rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2019, vol. 2, pp. 199-203.

9. Burlachenko O.V., Chesnokova O.G., Cherednichenko T.F. Issledovanie teplofizicheskikh svoistv sverkh-tonkoi zhidkoi teploizoliatsii [Investigation of thermophysical properties of ultrafine liquid thermal insulation]. *Aktual'nye problemy stroitel'nogo i dorozhnogo kompleksov. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posviashchennoi 50-letiiu Instituta stroitel'stva i arkhitektury Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta*. Ioshkar-Ola, 2019, pp. 199-204.

10. Navalikhina E.Iu., Trufanova N.M. Upravlenie tokovoi nagruzkoi linii v kabel'nom kanale s uchetom slozhnogo teploobmena [Control of the current load of lines in the cable channel taking into account complex heat

exchange]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2012, vol. 14, no. 4(5), pp. 1318-1321.

11. Kostarev N.A., Trufanova N.M. Issledovanie protsessov teplo-massopere-nosa v neftianoi skvazhine s uchetom protsessa parafinoobra-zovaniia [Study of heat and mass transfer processes in an oil well taking into account the paraffin formation process]. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii. Materialy vs Rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2017, vol. 2, pp. 136-142.

12. Mizonov V.E., Mitrofanov A.V., Basova E.V., Shuina E.A., Tannus K. Teoreticheskoe issledovanie teploprovodnosti v mnogosloinno-m sfericheskom tele s fazovymi perekhodami v sloiakh [Theoretical study of thermal conductivity in a multilayer spherical body with phase transitions in layers]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Khimiia i khimicheskaiia tekhnologiia*, 2020, vol. 63, no. 7, pp. 54-60.

13. Li H., Waldman R.M., Hu H. An experimental investigation on unsteady heat transfer and transient icing process upon impingement of water droplets. *54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. 54th*, 2016.

14. Zhang X., Li Z. Entransy of water vapor and its balance equation for heat and mass transfer process in the absorber. *International Heat Transfer Conference. Proceedings of the 16th International Heat Transfer Conference, IHTC 2018*, 2018, pp. 5795-5802.

15. Zhang X., Chen H., Liu F., Zhan D. Transient 3d simulation for heating and melting process of pwr core after sbo. *Annals of Nuclear Energy*, 2018, vol. 115, pp. 256-267.

16. Zemlianaia N.V., Shalanin V.A. Primenenie printsipa minimuma krivizny dlia rascheta form krivolineinykh vodoslivnykh poverkhnostei [Application of the minimum curvature principle for calculating the shapes of curved spillway surfaces]. *Vestnik inzhenernoi shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta*. Vladivostok, 2019, no. 4.

17. Zhang H.L., Chen Y.M., Zhou C.Q., Bing W.U. Numerical simulation of multiphase flow in a vanyukov furnace. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2015, no. 5, pp. 457-463.

18. Ivanov A.V., Smirnov Iu.D. Optimizatsiia raboty forsunki pylepodavleniia s ispol'zovaniem vychislitel'nogo modelirovaniia [Optimization of the dust suppression nozzle operation using computational modeling]. *Zapiski Gornogo instituta*. Saint Petersburg, 2013.

19. Wang T., Zhao H., Meng T. Analysis of tsunami effect and structural response. *Tehnicki Vjesnik*, 2015, no. 6, pp. 1365-1371.

20. Gol'tsov E.S., Diatlov I.Ia., Trufanova N.M. Chislennyi analiz protsessy teplomassoperenosa pri silanovoi sshivke v vodnoi vanne [Numerical analysis of the heat and mass transfer process in silane crosslinking in a water bath]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia. Kazan'*, 2019, no. 7.

Сведения об авторах

Гольцов Евгений Сергеевич (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: evgeny.goltsov@yandex.ru).

Дятлов Илья Яковлевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: d.i.994@yandex.ru).

Труфанова Наталия Михайловна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: trufanova@pstu.ru).

About the authors

Goltsov Eugene Sergeevich Sergeevich (Perm, Russian Federation) is a Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: evgeny.goltsov@yandex.ru).

Dyatlov Ilya Yakovlevich (Perm, Russian Federation) is a Graduate Student of the Department of designing and technology in electrical equipment Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: d.i.994@yandex.ru).

Trufanova Nataliya Mikhailovna (Perm, Russian Federation) is a Doctor of Technical Science, Professor, head of the Department of designing and technology in electrical equipment Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: ktei@pstu.ru).

Получено 07.10.2020