

УДК 679.7

DOI: 10.15593/2224-9397/2020.3.08

А.А. Корелин, И.Я. Дятлов, Н.М. ТруфановаПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ПЕРОКСИДНОЙ СШИВКИ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ НА СРЕДНЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ

При производстве кабелей на среднее и высокое напряжение чаще всего изоляцию сшивают пероксидным методом. Такой процесс сшивки является технически сложным, и для получения качественной изоляции необходимо грамотно подбирать и контролировать технологический режим, что влечет возникновение на производстве проблемы подбора таких параметров, как температура секций, скорость перемещения заготовки. Определение данных параметров эмпирическим путем подразумевает большие затраты материала и времени, поэтому предпочтительнее использовать расчетный метод. **Цели работы:** разработка математической модели процессов тепломассопереноса в наклонной линии вулканизации изоляции кабеля. Определение рациональных режимов работы оборудования. **Результаты:** методом конечных элементов реализована осесимметричная задача тепломассообмена в трубе вулканизации, получены поля температур по всей длине линии вулканизации, определены параметры оптимального режима работы вулканизационной линии. Для решения задачи использовано регрессионное выражение для определения степени сшивки в поперечных сечениях и по длине изоляционного покрытия. Реализация геометрии модели происходила при помощи сеточного генератора ANSYS ICM CFD, расчет производился решателем ANSYS Fluent. Для подтверждения адекватности разработанной модели проведен натурный эксперимент по определению максимальной температуры в изоляции, а также выполнено сравнение с результатами численного расчета. Проведена оценка сходимости разработанной модели, а также оценка адекватности модели путем сравнения с похожими исследованиями других авторов. В ходе работы получены кривые распределения температуры на поверхности жилы и изоляции по длине линии вулканизации. Оценено влияние на распределение температуры таких производственных факторов, как скорость изолирования и режим нагрева линии. На основе полученных данных произведен расчет степени сшивки изоляции и представлен оптимальный технологический режим сшивки. **Практическая значимость:** возможность использования предложенной математической модели для описания вулканизационных процессов для широкого спектра маркоразмеров кабелей среднего и высокого напряжения, выбор рациональных параметров режима вулканизации для проектируемых линий и коррекция существующих технологических режимов, что позволит повысить производительность линии без потери качества изготавливаемой продукции.

Ключевые слова: математическая модель, пероксидная сшивка, вулканизация, степень сшивки.

A.A. Korelin, I.Ya. Djatlov, N.M. Trufanova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

MATHEMATICAL MODEL AND NUMERICAL ANALYSIS OF THE PROCESS PEROXIDE CROSS-LINKING OF CABLE INSULATION ON MEDIUM VOLTAGE

In the production of medium and high voltage cables, insulation is most often cross-linked by the peroxide method. This process of crosslinking is technically complex and to obtain high-quality insulation, it is necessary to correctly select and control the technological mode, so there is a problem in the production of selecting parameters such as the temperature of the sections, the speed of movement of the billet. These parameters can be determined empirically or by calculation. Since the experimental path involves a large expenditure of material and time, it is preferable to use the calculated method of determination. **Purpose:** development of a mathematical model of heat and mass transfer processes in an inclined line of cable insulation vulcanization. The definition of rational modes of operation of the equipment. **Results:** an axisymmetric problem of heat and mass transfer in a vulcanization tube is implemented using the finite element method, temperature fields are obtained along the entire length of the vulcanization line, and parameters of the optimal operating mode of the vulcanization line are determined. To solve the problem, a regression expression is used to determine the degree of cross-linking in cross sections and along the length of the insulation coating. The model geometry was implemented using the ANSYS ICEM CFD grid generator, and the calculation was performed by the ANSYS Fluent solver. To confirm the adequacy of the developed model, a full-scale experiment was conducted to determine the maximum temperature in isolation, and a comparison was made with the results of numerical calculation. The convergence of the developed model is evaluated, as well as the adequacy of the model is evaluated by comparing it with similar studies. The study obtained temperature distribution curves on the surface of the core and insulation along the length of the vulcanization line. The influence of such production factors as the insulation rate and the heating mode of the line on the temperature distribution is estimated. Based on the data obtained, the degree of insulation cross-linking was calculated and the optimal technological mode of cross-linking was presented. **Practical relevance:** the possibility of using the proposed mathematical model to describe vulcanization processes for a wide range of type of medium and high voltage cables, the choice of rational parameters of the vulcanization mode for the designed lines and correction of existing technological modes, which will increase the productivity of the line without losing the quality of manufactured products.

Keywords: mathematical model, peroxide crosslinking, vulcanization, degree of crosslinking.

Введение. Для кабелей среднего и высокого напряжения в качестве изоляции используют сшитый полиэтилен, что позволяет прежде всего увеличить рабочую температуру кабеля. Сшивка представляет собой такой процесс, при котором в полиэтилен добавляют специальные добавки, катализаторы и вулканизирующие агенты, которые при тех или иных условиях начинают реагировать с молекулами полиэтилена, в результате чего меняют его молекулярную структуру. На сегодняшний день существуют три метода сшивки полиэтилена: пероксидная, силановая и радиационная, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. При силановой сшивке в качестве среды вул-

канизации используется пар или вода. Во влажной среде при относительно небольших температурах (до 170 °С) происходит гидролиз, в результате чего молекулы сшиваются между собой. Однако наличие влажной среды делает невозможным использование данного метода при производстве кабелей на среднее и высокое напряжение, так как в изоляции может оставаться влага, что приводит к снижению срока службы изоляции. Подробное описание технологии силановой сшивки, а также основные параметры и особенности рассмотрены в работах [2–3]. При радиационном методе сшивания используют электронно-лучевую пушку, которая в зависимости от толщины изоляции облучает её бета- или гамма-излучениями [4–5]. При такой сшивке имеется необходимость использования сложной системы перемотки заготовки для того, чтобы со всех сторон облучить изоляцию. Минусом данного метода является неравномерность сшивки к центру при увеличении толщины изоляции [6].

При пероксидной сшивке в качестве вулканизирующего агента чаще всего используют перекись дикумила, но он является не единственным. В статье [7] проведены обзор и сравнение других вулканизирующих агентов. Сама сшивка происходит в трубе вулканизации под воздействием температур свыше 250 °С. В работах [8–16] подробно описаны происходящие при пероксидной сшивке процессы. Такие процессы являются технически сложными, и для получения качественной изоляции необходимо грамотно подбирать и контролировать технологический режим, что влечет возникновение на производстве проблемы подбора технологических параметров.

Постановка задачи. Подбор технологических параметров сшивки изоляции эмпирическим (опытным) способом на производстве является экономически невыгодным, поскольку предполагает высокие временные и материальные затраты. Для решения данной проблемы целесообразно разработать математическую модель, которая путем расчета позволит определить требуемые параметры.

Цель исследования – разработка математической модели процессов тепломассопереноса в наклонной линии вулканизации изоляции кабеля для определения рациональных режимов работы технологического оборудования.

Объектом моделирования является линия вулканизации наклонного типа, которая состоит из двух частей – зоны нагрева (54 м) и зоны ох-

лаждения (114 м). Данный выбор обусловлен тем, что именно наклонные линии являются наиболее распространенными среди производителей кабелей, так как обслуживание и установка линии вертикального типа являются затратными и требуют строительства специального помещения с большой высотой (до 90 м). Поэтому задачи моделирования линий наклонного типа имеют большое практическое значение. Линия делится на связанные секции по 6 м каждая и несколько температурных зон. Схематично моделируемая линия представлена на рис. 1.

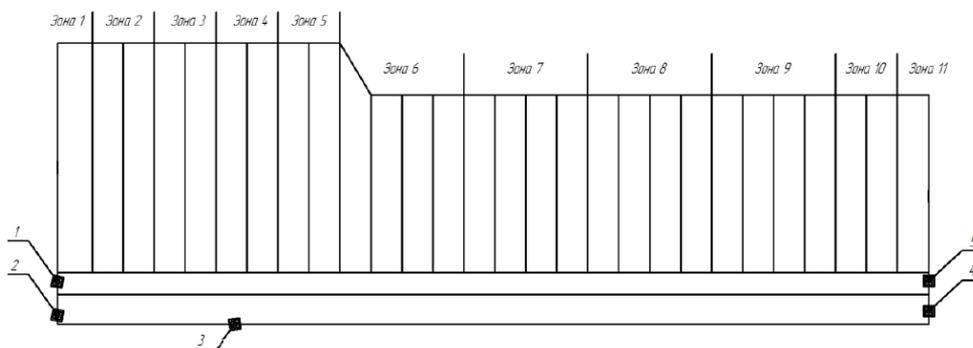


Рис. 1. Схематичное изображение линии и расстановка граничных условий: 1, 5 – изоляция; 2, 4 – токопроводящая жила; 3 – ось симметрии

Для упрощения задачи были сделаны несколько допущений: теплофизические свойства материалов кабеля постоянны; на границах раздела разнородных сред реализуется условие идеального теплового контакта; движение газообразной и жидкой среды – ламинарное; наклонная геометрия трубы заменена на горизонтальную; тепло, выделяемое в процессе шивки, не учитывается, так как оно мало [17].

Решаемая система уравнений с учетом сделанных допущений принимает вид:

– уравнения движения:

$$\rho_i \left(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \cdot \tau_{rr})}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \rho_i \beta (T - T_0) g, \quad (1)$$

$$\rho_i \left(v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \cdot \tau_{rz})}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\rho_i(T) = \rho_0 [1 - \beta (T - T_0)]; \quad (3)$$

– уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r \cdot v_r)}{\partial r} = 0; \quad (4)$$

– уравнения энергии:

$$c_i \rho_i \left(v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot q_r) + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + \tau_{rr} \cdot \dot{\gamma}_{rr} + \tau_{zz} \cdot \dot{\gamma}_{zz} + \tau_{rz} \cdot \dot{\gamma}_{rz}, \quad (5)$$

$$c_j \rho_j \left(v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot q_r) + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + \tau_{rr} \cdot \dot{\gamma}_{rr} + \tau_{zz} \cdot \dot{\gamma}_{zz} + \tau_{rz} \cdot \dot{\gamma}_{rz}; \quad (6)$$

– уравнения физические:

$$\tau_{rr} = 2\mu_b \frac{\partial v_r}{\partial r}; \quad \tau_{zz} = 2\mu_b \frac{\partial v_z}{\partial z}; \quad \tau_{rz} = \mu_b \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right), \quad (7)$$

где ρ – плотность, кг/м³; c – теплоёмкость, Дж/кг·°C; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·°C; μ – вязкость, Па·с; i – 1-азот, 2 – вода; j – 1-медь, 2-полиэтилен; τ_{ij} – тензор напряжений; T – температура, °C; v – компоненты вектора скорости, м/с [18].

Система дифференциальных уравнений (1)–(7) замыкается следующими граничными условиями (рис. 1): на входе задавались температуры: изоляции 120 °C, токопроводящей жилы 90 °C, на выходе – адиабата; на границах секций задавались адиабатические условия по температуре; зона нагрева включает в себя зоны 1–5, а зона охлаждения 6–11, температуры по зонам приведены в таблице; скорость изолирования составляла 0,3 м/с.

Решение данной системы уравнений методом конечных элементов осуществлялось в среде ANSYS Fluent.

Исследования на сходимость и устойчивость решения, при котором фиксировалась максимальная температура на поверхности жилы, показали, что достаточно 150 расчетных итераций и 65 тысяч элементов сетки.

Для проверки адекватности разработанной математической модели было проведено сравнение численных результатов, полученных на ее основе, с результатами работы [1], а также сравнение с результатами натурального эксперимента, проведенного на действующем оборудовании для конкретного технологического режима.

На рис. 2, а приведено изменение температуры на поверхности токопроводящей жилы по длине трубы вулканизации, полученное по предложенной модели и при подходе [1]. Максимальное отличие не превысило 3 %.

На рис. 2, б представлена зависимость температуры токопроводящей жилы от длины для заданного технологического режима. Максимальное значение температуры при этом оказалось равным 220 °С. Точкой на графике отмечена экспериментально замеренное максимальное значение температуры на жиле в ходе натурального эксперимента. Для проведения эксперимента на жилу перед изолированием была нанесена термонаклейка, которая позволила определить максимальную температуру жилы в трубе при сшивке, которая составила 198 °С. Таким образом, отличие численного и экспериментального значения составляет 10 %.

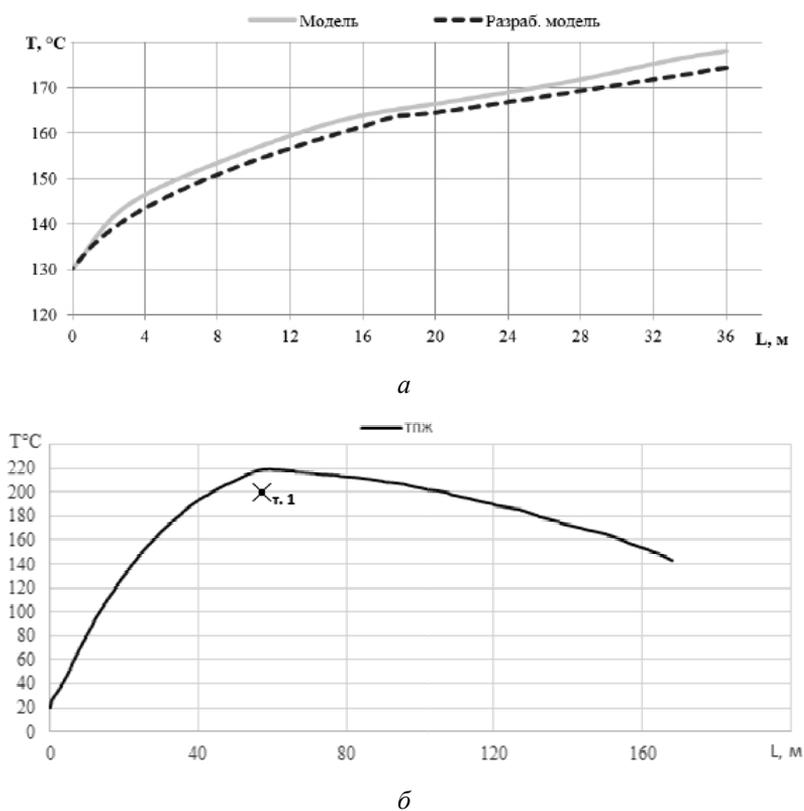


Рис. 2. Результаты исследования на адекватность: а – сравнение с существующим решением; б – сравнение с экспериментом

Полученные результаты позволяют говорить об адекватности разработанной модели.

Поскольку степень завершенности вулканизационного процесса, определяемая степенью вулканизации, зависит от реализуемой в дан-

ной точке изоляции температуры и ее изменения во времени или по длине, то необходимым является анализ температурных полей во всем пространстве вулканизационной трубы и, в частности, в каждой точке изоляции. Для того чтобы оценить, как скорость изолирования влияет на распределение температуры заготовки внутри трубы вулканизации, был проведен анализ температурных полей, результат которого приведен на рис. 3.

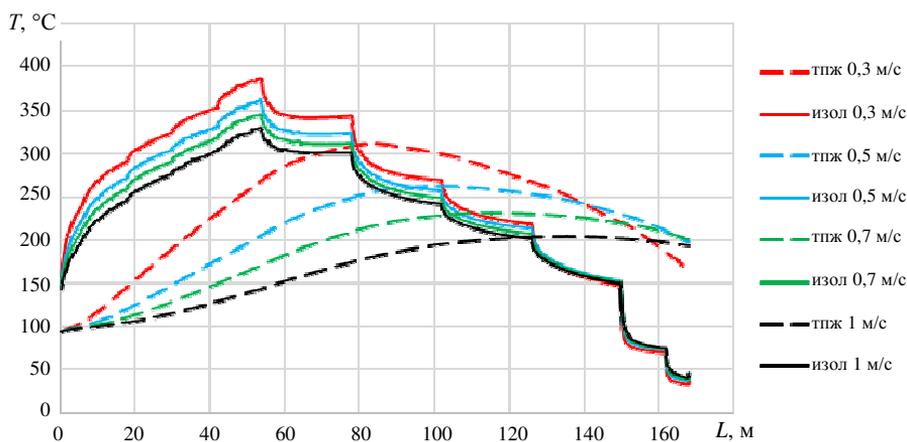


Рис. 3. График распределения температуры на поверхности жилы и изоляции при разных скоростях изолирования

Можно заметить, что температуры на поверхности жилы в конце зоны нагрева (54 м) с увеличением скорости изолирования стремительно падают. При скорости 0,3 м/с температура на поверхности жилы составляет 270 °С, а при скорости в 1 м/с температура падает на 48 % до 140 °С. Это связано с тем, что при увеличении скорости заготовка будет быстрее проходить по линии и гораздо меньше по времени находится внутри трубы вулканизации, а значит, будет хуже нагреваться. Из этого можно сделать вывод, что скорость изолирования является важным параметром технологического режима, которым нельзя пренебрегать.

Для оценки влияния изменения температурного режима нагрева и охлаждения линии на распределение температур внутри трубы вулканизации было проведено сравнение кривых распределения при изменении температур на 10 и 20 % от исходного режима при одной заданной скорости. В таблице приведены использованные для расчета температуры зон нагрева и охлаждения.

Температурный режим зон нагрева и охлаждения

Температура по зонам трубы, °С										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Исходный режим										
360	380	400	420	450	360	250	185	90	60	20
Снижение температур на 10 % от исходного режима										
324	342	360	378	405	324	225	166	90	60	20
Снижение температур на 20 % от исходного режима										
288	304	320	336	360	288	250	148	90	60	20

На основе данных, представленных в таблице, в результате расчета были построены кривые распределения температуры в зависимости от разных режимов нагрева линии (рис. 4).

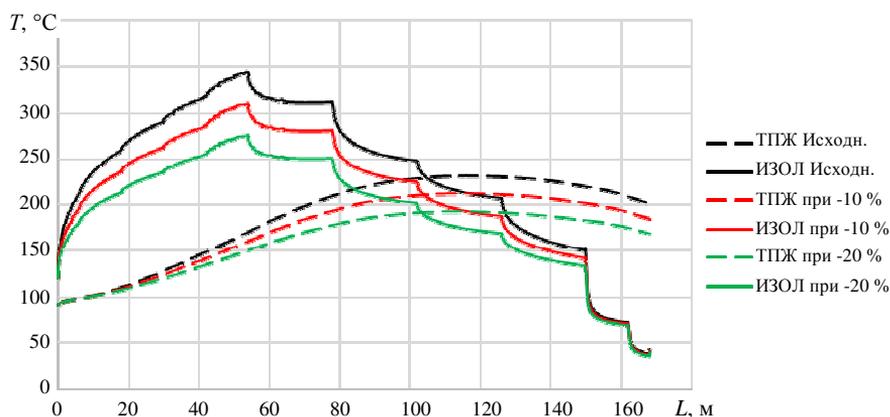


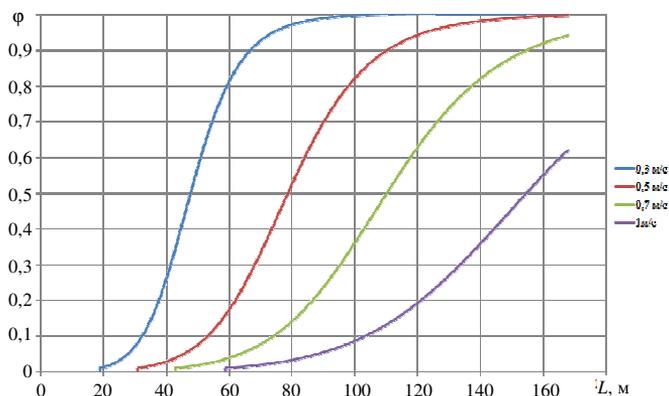
Рис. 4. График распределения температуры на поверхности жилы и изоляции при изменении режима нагрева и охлаждения линии

Снижение температур зон нагрева и охлаждения на 10 и 20 % приводят к снижению максимальных значений температур на 8 и 17 % соответственно, в то время как длины, на которых достигаются температуры начала вулканизации (150 °С), отличаются незначительно, и значения температур во всем объеме изоляции на протяжении 150 м остаются в области температур вулканизации.

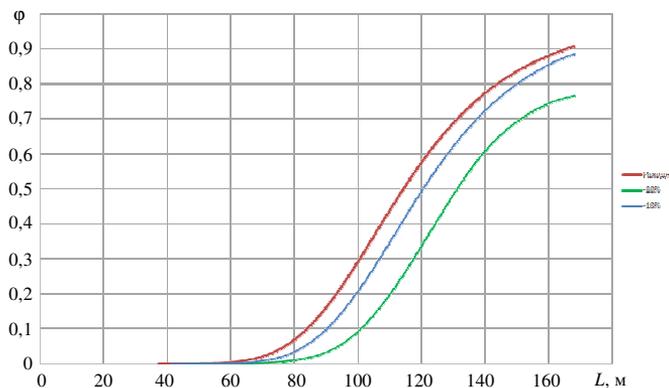
Так, изменяя режим нагрева и охлаждения, можно без потери качества продукта снизить стоимость производства за счет уменьшения энергозатрат на нагрев.

При определении оптимального режима изолирования необходимо опираться на величину степени сшивки на выходе из вулканизационной ванны. Зная поля распределения температур в поперечных сече-

ниях и по длине трубы и используя зависимость степени сшивки от температуры, приведенную в [17, 19], была получена зависимость степени сшивки от температурного профиля при изменении скорости изолирования (рис. 5, *а*), а также при изменении температурного режима (рис. 5, *б*). Результаты представлены на рис. 5.



а



б

Рис. 5. Графики степени сшивки в зависимости от изменения: *а* – скорости изолирования; *б* – температурного режима нагрева и охлаждения

Видно, что при увеличении скорости сшивание полимера происходит медленнее. При скорости 0,3 м/с внутренний слой изоляции сшивается полностью на длине 100 м, при скорости 0,5 м/с – на длине 160 м. Степень сшивки на расстоянии 160 м с увеличением скорости до 0,7 м/с уменьшается всего на 8 % и составляет 92 %. Следовательно, из этого можно сделать вывод, что есть возможность повысить скорость изолирования без потери качества сшивки.

Далее при выбранной скорости изолирования 0,7 м/с проводился расчет степени сшивки при снижении температурного режима нагрева и охлаждения. На рис. 5, б можно увидеть, что при снижении температур в зонах степень сшивки падает. Из производственного опыта известно, что при изготовлении кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена степень сшивки готового изделия должна быть не ниже 60 %. Исходя из этого, можно сделать вывод, что, снизив температурный режим на 20 % на выходе, можно получить изоляцию со степенью сшивки 76 %. Такой результат является приемлемым и оптимальным, так как при снижении температурного режима снижаются значительные производственные энергозатраты.

Выводы. В рамках исследования разработана математическая модель, позволяющая анализировать температурные поля при пероксидной сшивке, а также рассчитать степень сшивания изоляции для широкого спектра маркоразмеров кабелей среднего и высокого напряжения.

Получены кривые распределения температурного поля по линии вулканизации и определен оптимальный технологический режим. Результаты проверки предложенного подхода на адекватность показывают, что разработанная модель достаточно точно решает поставленные задачи и может быть в дальнейшем использована для оптимизации работы как проектируемых, так и действующих технологических объектов путем выбора рациональных параметров вулканизации (скорость изолирования, режим нагрева линии и охлаждения, степень сшивки), которые позволяют обеспечить получение качественного продукта при наименьших энергозатратах.

Библиографический список

1. Kosar V., Gomzi Z. Modeling of the power cable production line // *Thermochimica Acta.* – 2007. – No. 457. – P. 70–82.
2. Электрическая система испытаний силовых кабелей всех классов напряжений с изоляцией из сшитого полиэтилена / В.П. Карпушенко [и др.] // *Электротехника и электромеханика.* – 2013. – № 4. – С. 60–64.
3. Гольцов Е.С., Дятлов И.Я., Труфанова Н.М. Численный анализ процесса тепломассопереноса при силановой сшивке в водной ванне // *Научно-технический вестник Поволжья.* – 2019. – № 7. – С. 91–94.
4. Новиков Г.К. Модификация радиационной сшивки в электрическом газовом разряде и механическая прочность полиэтиленовой ка-

бельной изоляции // Вестник Иркутск. гос. техн. ун-та. – 2017. – № 8. – С. 122–129.

5. Гурин А.Г., Корнилов Е.А., Ложкин Р.С. Перспективы применения сильноточных электронных пучков для радиационной сшивки полиэтилена // Электротехника и электромеханика. – 2013. – № 4.

6. Скрозников С.В. Закономерности формирования структурно-механических свойств сшитых полиолефинов для кабельной техники: дис. канд. техн. наук. – М., 2015. – 149 с.

7. Ogunniyi D.S. Peroxide vulcanization of rubber // Progress in rubber plastics and recycling technology. – 1999. – No. 15(2). – P. 95–112.

8. Gunewardena, A., Gilbert, M. Peroxide crosslinking of rigid polyvinylchloride // Journal of Vinyl & Additive Technology. – 2008. – No.14(3). – P. 92–98.

9. Jiachun Wu, Zi Liang Wu, Hongmei Yang, Qiang Zheng // RSC Advances. – 2014. – No. 4.

10. Модификация пероксидного способа сшивания полиэтилена для кабельной техники / С.В. Скрозников, Д.И. Лямкин, А.Н. Жемерикин, А.В. Кобец, П.А. Черкашин, С.В. Черепенников // Успехи в химии и химической технологии. – 2011. – Т. 25. – № 12(128).

11. Likoazar Blaz, Krajnc Matjaz. Kinetic modeling of the peroxide cross-linking of polymers: From a theoretical model framework to its application for a complex polymer system // Chemical Engineering and Processing. – 2011. – No. 50(2). – P. 200–210.

12. Atomistic-scale insights into the crosslinking of polyethylene induced by peroxides / Dooman Akbarian, Hossein Hamed, Behzad Damirchi, Dundar E. Yilmaz, Katheryn Penrod, W.H. Hunter Woodward, Jonathan Moore, Michael T. Lanagan, Adri C.T. van Duin // Polymer. – 2019. – No. 183.

13. Bharat Indu Chaudhary, Thomas H.Peterson. Thermoreversible crosslinking of polyethylene enabled by free radical initiated functionalization with urethane nitroxyls // Polymer. – 2010. – Vol. 51, no. 1. – P. 153–163.

14. Kruzalak Jan, Kvasnicakova Andrea, Hudec Ivan. Peroxide curing systems applied for cross-linking of rubber compounds based on SBR // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. – 2020.

15. Liu Shan-Qiu, Gong Wei-Guang, Zheng Bai-Cun. The Effect of Peroxide Cross-Linking on the Properties of Low-Density Polyethylene // Journal of Macromolecular Science. – 2014. – Part B. – Vol. 53, No. 1. – P. 67–77.

16. Yeoh O.H. Mathematical Modeling of Vulcanization Characteristics // American chemical society division of rubber chemistry. – 2012. – No. 85(3). – P. 482–492.

17. Исследование теплофизических характеристик кабельных резиновых смесей на различной стадии вулканизации / Х.Э. Мамедов, Р.А. Мустафаев, В.Н. Кириллов, В.В. Столбов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1985. – № 9.

18. Труфанова Н.М. Переработка полимеров. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009.

19. Корелин А.А., Дятлов И.Я., Труфанова Н.М. Численное исследование процесса сшивки полиэтилена в вулканизационной трубе в среде азота // Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – № 7. – С. 114.

References

1. Kosar V., Gomzi Z. Modeling of the power cable production line. *Thermochimica Acta*, 2007, no. 457, pp. 70-82.

2. Karpushenko V.P. et al. Elektricheskaiia sistema ispytanii silovykh kabelei vsekh klassov napriazhenii s izoliatsiei iz sshitogo polietilena [Electrical testing system for power cables of all voltage classes with cross-linked polyethylene insulation]. *Elektrotehnika i elektromekhanika*, 2013, no. 4, pp. 60-64.

3. Gol'tsov E.S., Diatlov I.Ia., Trufanova N.M. Chislennyi analiz protsessa teplomassopere nosa pri silanovoi sshivke v vodnoi vanne [Numerical analysis of heat and mass transfer during the process of silane crosslinking in water bath]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2019, no. 7, pp. 91-94.

4. Novikov G.K. Modifikatsiia radiatsionnoi sshivki v elektricheskom gazovom razriade i mekhanicheskaiia prochnost' polietilenovoi kabel'noi izoliatsii [Modification of radiation cross-linking in electric gas discharge and mechanical strength of polyethylene cable insulation]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, no. 8, pp. 122-129.

5. Gurin A.G., Kornilov E.A., Lozhkin R.S. Perspektivy primeneniia sil'notochnykh elektronnykh puchkov dlia radiatsionnoi sshivki polietilena [Prospects of high-current electron beams application to radiation polyethylene cross-linking]. *Elektrotehnika i elektromekhanika*, 2013, no. 4.

6. Skroznikov S.V. Zakonomernosti formirovaniia strukturno-mekhanicheskikh svoistv sshitykh poliolefinov dlia kabel'noi tekhniki [Regularities of formation of structural and mechanical properties of cross-linked polyolefins for cable equipment]. Ph. D. thesis. Moscow, 2015, 149 p.

7. Ogunniyi D.S. Peroxide vulcanization of rubber. *Progress in rubber plastics and recycling technology*, 1999, no. 15(2), pp. 95-112.

8. Gunewardena A., Gilbert M. Peroxide crosslinking of rigid polyvinylchloride. *Journal of Vinyl & Additive Technology*. 2008, no. 14(3), pp. 92-98.

9. Jiachun Wu, Zi Liang Wu, Hongmei Yang, Qiang Zheng. *RSC Advances*, 2014, no. 4.

10. Skroznikov S.V., Liarkin D.I., Zhemerikin A.N., Kobets A.V., Cherkashin P.A., Cherepennikov S.V. Modifikatsiia peroksidnogo sposoba sshivaniia polietilena dlia kabel'noi tekhniki [Modification of the peroxide method for crosslinking polyethylene for cable equipment]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 2011, vol. 25, no. 12(128).

11. Likozar Blaz, Krajnc Matjaz. Kinetic modeling of the peroxide cross-linking of polymers: From a theoretical model framework to its application for a complex polymer system. *Chemical Engineering and Processing*, 2011, no. 50(2), pp. 200-210.

12. Dooman Akbarian, Hossein Hamed, Behzad Damirchi, Dunder E. Yilmaz, Katheryn Penrod, W.H. Hunter Woodward, Jonathan Moore, Michael T. Lanagan, Adri C.T. van Duin Atomistic-scale insights into the crosslinking of polyethylene induced by peroxides. *Polymer*, 2019, no. 183.

13. Bharat Indu Chaudhary, Thomas H. Peterson. Thermoreversible crosslinking of polyethylene enabled by free radical initiated functionalization with urethane nitroxyls. *Polymer*, 2010, vol. 51, no. 1, pp. 153-163.

14. Kruzalak Jan, Kvasnicakova Andrea, Hudec Ivan. Peroxide curing systems applied for cross-linking of rubber compounds based on SBR. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2020.

15. Liu Shan-Qiu, Gong Wei-Guang, Zheng Bai-Cun. The Effect of Peroxide Cross-Linking on the Properties of Low-Density Polyethylene. *Journal of Macromolecular Science*, 2014, part B, vol. 53, no. 1, pp. 67-77.

16. Yeoh O.H. Mathematical Modeling of Vulcanization Characteristics. *American chemical society division of rubber chemistry*, 2012, no. 85(3), pp. 482-492.

17. Mamedov Kh.E., Mustafaev R.A., Kirillov V.N., Stolbov V.V. Issledovanie teplofizicheskikh kharakteristik kabel'nykh rezinovykh smesei na razlichnoi stadii vulkanizatsii [Investigation of thermophysical characteristics of cable rubber mixtures at various stages of vulcanization]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz*, 1985, no. 9.

18. Trufanova N.M. Pererabotka polimerov [Polymer processing]. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2009.

19. Korelin A.A., Diatlov I.Ia., Trufanova N.M. Chislennoe issledovanie protsessa sshivki polietilena v vulkanizatsionnoi trube v srede azota [Numerical study of cross-linking of polyethylene in vulcanization tube in a nitrogen environment]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2019, no. 7, pp. 114.

Сведения об авторах

Корелин Артём Александрович (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: korelin-art@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: ktei@pstu.ru).

About the authors

Korelin Artem Aleksandrovich (Perm, Russian Federation) is a Master's Student of the Department of “Design and technology in electrical engineering” Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: korelin-art@yandex.ru).

Diatlov Iliia Iakovlevich (Perm, Russian Federation) is a Graduate Student of the Department of “Design and technology in electrical engineering” Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: d.i.994@yandex.ru).

Trufanova Nataliia Mikhailovna (Perm, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Professor, head of the Department “Design and technology in electrical engineering” Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: ktei@pstu.ru).

Получено 17.08.2020