

## Механизм процесса упрочнения полимерной изоляции электрооборудования тягового подвижного состава тепловым излучением

В. А. Кручек<sup>1</sup>, А. М. Худоногов<sup>2</sup>✉, Е. Ю. Дульский<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I,

г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>2</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

✉ a.hudonogov@yandex.ru

### Резюме

В статье рассмотрены актуальные вопросы, связанные с теоретическим обоснованием новой методики определения времени окончания процесса сушки полимерной изоляции обмоток электрооборудования тягового подвижного состава с использованием инфракрасного излучения. Одной из частично нерешенных проблем использования инфракрасного излучения в процессе ремонта изоляционных конструкций обмоток электрического оборудования тягового подвижного состава оставалась проблема определения времени останова технологического процесса сушки на специализированном оборудовании. Длительность процесса сушки при штатной технологии с использованием конвективных электрических печей диктуется заводом изготовителем изоляционных материалов и пропиточных составов, что обусловлено соответствующими испытаниями по оценке остаточного содержания растворителя. Исследования кинетики механизма процесса кристаллизации жидкого полимера под действием теплового излучения, проводимые в лабораторных и производственных условиях, показали, что у основных химических фракций необходимые изменения заканчиваются вполне в определенный период времени, когда заканчивается период роста зерен. Данные особенности были использованы при создании новой методики по определению времени окончания процесса сушки на основании изменения объема полимера на поверхности изоляции. В этой связи была выдвинута гипотеза о том, что каждому из значений плотности мощности теплового излучения в процессе кристаллизации жидких полимеров соответствует оптимальное время технологического процесса по упрочнению изоляционных конструкций. Механизм перехода жидкого полимера в твердое состояние с заданными физическими характеристиками под действием теплового излучения требует прецизионных экспериментальных исследований.

### Ключевые слова

полимерная изоляция, жидкий полимер, процесс сушки, электрооборудование, тяговый подвижной состав, тепловое излучение

### Для цитирования

Кручек В. А. Механизм процесса упрочнения полимерной изоляции электрооборудования тягового подвижного состава тепловым излучением / В. А. Кручек, А. М. Худоногов, Е. Ю. Дульский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – Т. 65 № 1. – С. 144–149. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.1(65).144-149

### Информация о статье

поступила в редакцию: 15.12.2019, поступила после рецензирования: 21.01.2020, принята к публикации: 17.02.2020

## Mechanism of polymeric insulation strengthening of electric equipment of traction rolling stock by thermal radiation

V. A. Kruchek<sup>1</sup>, A. M. Khudonogov<sup>2</sup>✉, E. Yu. Dul'skii<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, the Russian Federation

<sup>2</sup> Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation

✉ a.hudonogov@yandex.ru

### Abstract

The article discusses current issues related to the theoretical justification of a new methodology for determining the end time of the drying process of polymeric insulation of windings of traction rolling stock electric equipment using infrared radiation. One of the partially unresolved problems of using infrared radiation in the process of repair of insulating structures of windings of the traction rolling stock electric equipment was the determination of the time for stopping the drying process using specialized devices. The duration of the drying process with standard technology using convective electric furnaces is determined by the manufacturer of the insulating materials and impregnating compounds, which is due to appropriate tests, according to the assessment of the residual solvent content. Studies of the kinetics of the mechanism of crystallization of a liquid polymer under the influence of thermal radiation, carried out under laboratory and industrial conditions, have shown that for the main chemical fractions, the necessary changes end quite at a certain period of time, when the grain growth period ends. These features were used to create a new methodology for determining the end time of the drying process, based on changes in the volume of the polymer on the insulation surface. In this regard, a hypothesis was put forward that each of the values of the thermal radiation power density during the crystallization of liquid polymers corresponds to the optimal process time for hardening of the

insulating structures. The mechanism of transition of a liquid polymer to a solid state with given physical characteristics under the action of thermal radiation requires precision experimental research.

### Keywords

polymeric insulation, liquid polymer, drying process, electrical equipment, traction rolling stock, thermal radiation

### For citation

Kruchek V. A., Khudonogov A. M., Dul'skii E. Yu. Mekhanizm protsessa uprochneniya polimernoy izolyatsii elektrooborudovaniya tyagovogo podvizhnogo sostava teplovym izlucheniym [Mechanism of polymeric insulation strengthening of electric equipment of traction rolling stock by thermal radiation]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2020, Vol. 65, No. 1, pp. 144–149. 10.26731/1813-9108.2020.1(65).144-149

### Article Info

Received: 15.12.2019, Revised: 21.01.2020, Accepted: 17.02.2020

### Введение

Одними из наиболее уязвимых к отказам элементов оборудования тягового подвижного состава являются изоляционные конструкции [1–4], при этом их ремонт достаточно дорогой и трудоемкий. В процессе ремонта структуру и физико-механические свойства изоляции восстанавливают с помощью пропитки в компаундах с последующей сушкой в конвективных электрических печах высокой мощности. Длительность такой сушки устанавливается заводом изготовителем полимерной изоляции и может достигать 15 ч.

С целью повышения производительности ремонта изоляции сотрудниками Иркутского государственного университета путей сообщения предлагается технология и техника упрочнения полимерной изоляции электрооборудования с использованием инфракрасного излучения, которое имеет более высокую плотность направленного теплового потока.

Одной из частично нерешенных задач использования инфракрасного излучения в процессе сушки полимерной изоляции является определение времени окончания процесса сушки.

Объектами исследования данной статьи выбраны жидкие терморезистивные и термопластичные полимеры электроизоляционного назначения. Механизм перехода жидкого полимера в твердое состояние под действием энергии теплового излучения является сложным кинетическим процессом кристаллизации [5–8], развивающимся во времени и затрагивающим различные уровни атомной, молекулярной и надмолекулярной организации.

### Постановка проблемы

Проблема упрочнения электроизоляционных конструкций на основе жидких полимеров с использованием когерентного и некогерентного теплового излучения с теоретической точки зрения является весьма сложной и существенно не решенной. Однако в настоящее время накоплен значительный экспериментальный материал по применению жидких полимеров для упрочнения изоляционных конструкций силового электрооборудования тягового подвижного состава некогерентным тепловым излучением, который может быть положен в дальнейшем в основу

математического моделирования механизма процесса упрочнения электроизоляции [9–11].

### Теоретическое обоснование кинетики механизма процесса кристаллизации жидкого полимера

Более глубокое изучение кинетики механизма процесса кристаллизации жидкого полимера под действием теплового излучения, проведенное в лабораторных и производственных условиях, показало, что у основных химических фракций необходимые изменения заканчиваются вполне в определенный период времени [4], когда заканчивается период роста зерен. Дальнейшее увеличение времени облучения в процессе кристаллизации полимеров приведет к нежелательным химическим изменениям и к снижению качественных показателей изоляционных конструкций. Наиболее ярко это проявляется в технологии восстановления изоляционных пальцев кронштейнов щеткодержателей коллекторных электрических машин. Здесь наглядно просматривается связь между скоростью нагрева жидкого полимера тепловым излучением в процессе кристаллизации, обусловленная плотностью излучения, и увеличением зерновых цепей, определяющих показатели прочности. Реальная кривая роста объема зерен с течением времени имеет S-образный вид (рис. 1).

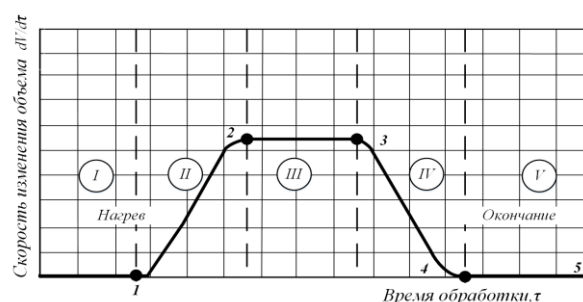
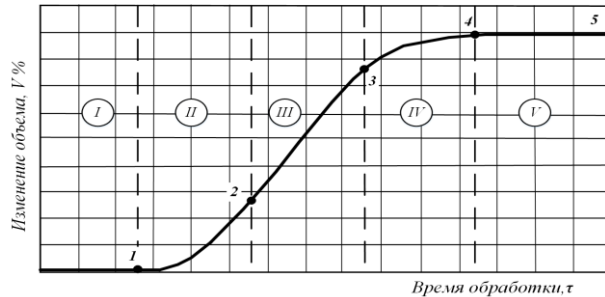


Рис. 1. Кривая роста объема зерен в процессе кристаллизации жидкого полимера тепловым излучением

Fig. 1. Grain volume growth curve in the process of crystallization of the liquid polymer by thermal radiation

С целью дальнейшего теоретического анализа произведено графическое дифференцирование кривой роста объема зерен, в результате чего получена кривая скорости роста их объема (рис. 2).



**Рис. 2.** Кривая скорости роста объема зерен в процессе кристаллизации жидкого полимера тепловым излучением

**Fig. 2.** Grain volume growth curve in the process of crystallization of the liquid polymer by thermal radiation

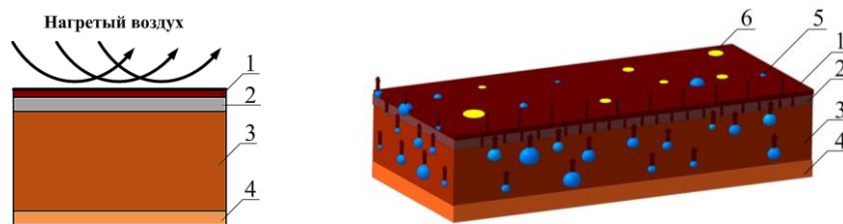
Графический вид кривых роста объема зерен и скорости увеличения их объема типичен для многих термических процессов. Физически это объясняется наличием в процессе кристаллизации полимеров трех основных периодов из приведенных пяти:

- прогрев и нарастающая скорость роста объема зерен;
- постоянная скорость роста объема зерен;
- падающая скорость роста объема зерен.

В точке 1 начало процесса кристаллизации жидкого полимера, в точке 4 окончание. В этой связи была выдвинута гипотеза о том, что каждому из значений плотности мощности теплового излучения в процессе кристаллизации жидких полимеров, соответствует оптимальное время технологического процесса по упрочнению изоляционных конструкций.

Механизм перехода жидкого полимера в твердое состояние с заданными физическими характеристиками под действием теплового излучения требует прецизионных экспериментальных исследований [12–18].

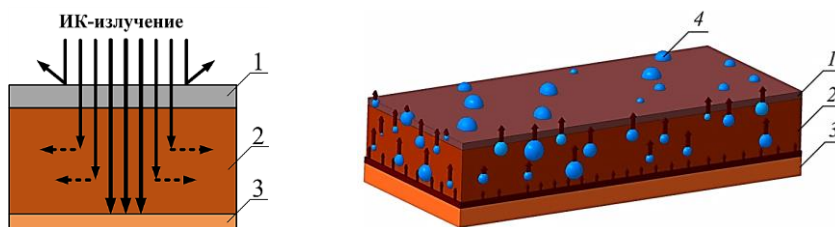
При переходе полимера из жидкого состояния в твердое под действием теплового излучения интенсивность и дозовые характеристики лучистого потока на порядки более существенны, чем при кристаллизации с помощью обычных тепловых источников нагрева, например, конвективным нагревом (рис. 3) [4, 12–18], поэтому в ряде случаев необходим учет пороговых энергетических значений по интенсивности и дозе для конкретных образцов и их огне- и абляционной стойкости в поле теплового излучения. Закономерно возникает интерес к созданию функциональной стойкости жидких полимерных материалов к действию мощного инфракрасного теплового излучения (рис. 4) [4, 12–18], необходимо знание кинетических и химических



**Рис. 3.** Дефектообразование при использовании конвективного метода сушки изоляции обмоток: 1 – лаковая пленка; 2 – пропиточный материал (лак, компаунд.); 3 – пропитанный изоляционный материал; 4 – проводник обмотки; 5 – пары растворителя; 6 – полости (микротрещины)

**Fig. 3.** Defect formation using the convective method of drying the insulation of the windings:

1 – varnish film; 2 – impregnating material (varnish, compound); 3 – impregnated insulating material; 4 – winding conductor; 5 – solvent vapors; 6 – cavity (microcracks)



**Рис. 4.** Распространение инфракрасных лучей по глубине слоя полимерной изоляции

1 – электроизоляционный пропиточный материал (лак, компаунд.); 2 – пропитанный изоляционный материал; 3 – проводник обмотки; 4 – пары растворителя

**Fig. 4.** The distribution of infrared rays in the depth of polymer insulation

1 – electrical insulating impregnating material (varnish, compound); 2 – impregnated insulating material; 3 – winding conductor; 4 – solvent vapors

аспектов возникновения и развития кристаллизованных структур, приводящих к данным свойствам, их особенностей для различных классов полимеров.

Чрезвычайно важен факт возможности образования градиентных по свойствам структур с неомогенными физико-химическими характеристиками по толщине образца. При кристаллизации жидких полимеров тепловым излучением образуются, как правило, необратимые модифицированные структуры и соответствующие функциональные характеристики.

### Экспериментальные исследования

Для того чтобы доказать выдвинутую гипотезу и закономерности процесса кристаллизации жидких полимеров тепловым излучением методикой и техникой экспериментальных исследований необходимо спланировать несколько серий опытов, после обработки которых можно приступать к выбору первоначальных математических моделей. Программой экспериментальных работ необходимо предусмотреть исследование влияния режимов инфракрасного энергоподвода применительно к различным физико-химическим свойствам жидких полимеров. В качестве основного критерия качества процесса кристаллизации следует выбрать, к примеру, шероховатость изоляционного пальца, а также механическую и электрическую прочность и эластичность.

Для повышения достоверности проведения эксперимента был подготовлен образец секции обмотки якоря ТЭД с реальным размещением слоев изоляции. В глубину изоляции на проводнике была размещена термопара прибора, вторая размещалась на поверхности. Схема и иллюстрация проведения эксперимента представлены (рис. 5, 6).

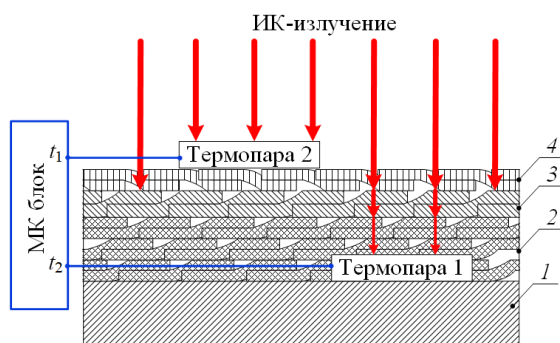


Рис. 5. Схема проведения эксперимента:

1 – медная пластина; 2 – три слоя в полуперекрышу ленты стеклослюдинитовой марки «Элмикатерм»; 3 – один слой в полуперекрышу полиамидной пленки «Изофлекс»; 4 – один слой в полуперекрышу ленты ЛЭС

Fig. 5. The scheme of the experiment:

1 – copper plate; 2 – three half-overlapping layers of the glass-micanite tape "Elmicaterm"; 3 – one half-overlapping layer of the polyamide film "Isoflex"; 4 – one half-overlapping layer of the glass tape "LES"



Рис. 6. Образец обмотки якоря тягового электродвигателя с размещенными термопарами  
Fig. 6. A sample of the winding of the armature of the traction motor with mixed thermocouples

Внутреннее и внешнее расположение термопар позволило получить кривые нагрева проводника от инфракрасного излучения в сравнении с верхним слоем (рис. 7).

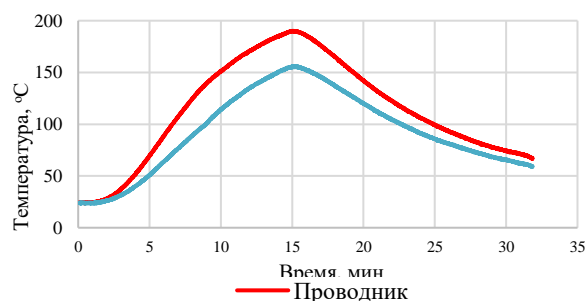


Рис. 7. Кривые нагрева слоев образца обмотки якоря тягового электродвигателя

Fig. 7. The heating curves of the layers of the sample winding of the armature of the traction motor

Как видно из кривых нагрева внутренние слои изоляции, а также проводник в частности, нагреваются до большей температуры (на 20 °С больше), чем наружные слои.

Безусловно, что при этом необходимо учитывать и теплопередачу между слоями, однако разность температур обусловлена именно высоким значением коэффициента пропускания верхних слоев (пропитанная лента «ЛЭС», полиамидная пленка). Для этих целей в дальнейшем возможно осуществлять предварительное математическое моделирование, к примеру, с использованием метода конечных элементов или конечных разностей [19–21], что позволит наиболее полно исследовать данные процессы.

### Заключение

Таким образом, определение времени окончания процесса сушки полимерной изоляции с использованием инфракрасного излучения на основании оценки скорости изменения объема полимера позволяет с высокой точностью выставлять режимы сушки. Данный подход открывает возможности для дальнейшего изучения кинетики изменения структуры полимера, что будет представлено в дальнейших работах.

## Список литературы

1. Дульский Е.Ю. Энергоаудит безразборной технологии ремонта магнитной системы тяговых двигателей электровозов [Текст] / Е.Ю. Дульский / Мир транспорта. 2012. Т. 10. № 3 (41). С. 168–171.
2. Дульский Е.Ю. Совершенствование технологии ремонта магнитной системы тяговых двигателей электровозов [Текст] / Е.Ю. Дульский // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 4 (63). С. 103–108.
3. Дульский Е.Ю. Анализ пространственного распределения инфракрасного излучения в процессе капсулирования изоляции электрических машин тягового подвижного состава [Текст] / Е.Ю. Дульский // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 7 (78). С. 132–136.
4. Дульский Е.Ю. Исследование эффективности конвективного и терморadiационного методов капсулирования изоляции обмоток при ремонте электрических машин тягового подвижного состава [Текст] / Е.Ю. Дульский, Н.С. Доценко Е.М. Лыткина // Известия Трансиба. 2014. № 1 (17). С. 14–19.
5. Сулягин В.М. Химия и физика полимеров [Текст]: учеб. пособ. / В.М. Сулягин, Л.И. Бондалетова // Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 208 с.
6. Сулягин В.М. Основные свойства полимеров [Текст]: учеб. пособ. / В.М. Сулягин, О.С. Кукурина, В.Г. Бондалетов // Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 96 с.
7. Аскадский А.А., Введение в физикохимию полимеров [Текст] / А.А. Аскадский, А.Р. Хохлов // М.: Научный мир, 2009. – 380 с.
8. Крыжановский В.К. Прикладная физика полимерных материалов [Текст] / В.К. Крыжановский, В.В. Бурлов // – СПб: Изд-во СПбГТИ(ТУ), 2001. – 261 с.
9. Дульский Е.Ю. Моделирование режимов ИК-энергоподвода в технологии продления ресурса тяговых электрических машин с использованием метода конечных элементов [Текст] / Е.Ю. Дульский // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 12 (83). С. 258–263.
10. Александров А.А. Прогнозирование остаточных напряжений возникающих при термообработке алюминиевых сплавов / Александров А.А. // Инженерный вестник Дона. – 2015 – № 4 (38). – С. 128.
11. Александров А.А. Моделирование термических остаточных напряжений при производстве маложестких деталей: дисс. ... канд. техн. наук / А.А. Александров Иркутск: – 2016. – 165 с.
12. Зигель Р. Теплообмен излучением [Текст] : пер. с англ. / Р. Зигель, Дж. Хауэлл ; – М.: Мир, 1975. – 934 с.
13. Бураковский Т. Инфракрасные излучатели [Текст] : пер. с польск. / Т. Бураковский, Е. Гизинский, А. Саля. – Л.: Энергия, 1978. – 408 с.
14. Патент РФ № 2396669, 04.05.2009. Локальный способ герметизации компаундом изоляции лобовых частей обмоток тяговых электрических машин. Патент России № 2396669. Бюл. № 22. / А.М. Худоногов, И.А. Худоногов [и др.].
15. Иванов В.Н. Электротехнологическое продление ресурса электрических машин тепловым излучением [Текст] : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 2014. – 178 с.
16. Васильев А.А. Совершенствование технологии деповского ремонта вспомогательных электрических машин электропоездов [Текст] : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Омск. 2018. – 137 с.
17. Лыткина Е.М. Повышение эффективности капсулирования изоляции лобовых частей обмоток тяговых двигателей ЭПС инфракрасным излучением [Текст] : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Иркутск. 2011. – 205 с.
18. Оленевич Д.А. Совершенствование системы технического содержания изоляции тяговых двигателей ЭПС [Текст] : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Иркутск, 2010. – 146 с.
19. Румянцев А.В. Метод конечных элементов в задачах теплопроводности [Текст]: учеб. пособ. / А.В. Румянцев. Калининград. Ун-т. Калининград, 1995. – 170 с.
20. Румянцев А.В. Метод конечных элементов в задачах теплопроводности [Текст]: учеб. пособ. / А.В. Румянцев. Изд. 3-е, перераб. – Российский госуниверситет им. И. Канта. – Калининград. 2010. – 95 с.
21. Пыхалов А.А. Расчет сборных роторов турбомашин с применением неголономных контактных связей и метода конечных элементов [Текст] / А.А. Пыхалов, А.В. Высокотский // Компрессорная техника и пневматика. 2003. № 8. С. 25.

## References

1. Dul'skii E.Yu. Energoaudit bezrazbornoi tekhnologii remonta magnitnoi sistemy tyago-vykh dvigatelei elektrovozov [Energy audit of CIP repair technology for the magnetic system of traction engines of electric locomotives]. *Mir transporta [World of Transport]*, 2012, Vol. 10, No. 3 (41), pp. 168–171.
2. Dul'skii E.Yu. Sovershenstvovanie tekhnologii remonta magnitnoi sistemy tyagovykh dvi-gatelei elektrovozov [Improving the technology of repair of the magnetic system of traction engines of electric locomotives]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2012, No. 4 (63), pp. 103–108.
3. Dul'skii E.Yu. Analiz prostranstvennogo raspredeleniya infrakrasnogo izlucheniya v pro-tsesse kapsulirovaniya izolyatsii elektricheskikh mashin tyagovogo podvizhnogo sostava [Analysis of the spatial distribution of infrared radiation in the process of encapsulation of insulation of electric machines of traction rolling stock]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2013, No. 7 (78), pp. 132–136.
4. Dul'skii E.Yu., Dotsenko N.S., Lytkina E.M. Issledovanie effektivnosti konvektivnogo i termoradiatsionnogo meto-dov kapsulirovaniya izolyatsii obmotok pri remonte elektricheskikh mashin tyagovogo podvizhnogo sostava [Study of the efficiency

of convective and thermoradiation methods of encapsulation of winding insulation in the repair of electric vehicles of traction rolling stock]. *Izvestiya Transsiba [Journal of Transsib Railway Studies]*, 2014, No. 1 (17), pp. 14–19.

5. Sutyagin V.M., Bondaletova L.I. Khimiya i fizika polimerov: ucheb. posob. [Chemistry and physics of polymers: a textbook]. Tomsk: TPU Publ., 2003, 208 p.

6. Sutyagin V.M., Kukurina O.S., Bondaletov V.G. Osnovnye svoystva polimerov: ucheb. posob. [The main properties of polymers: a textbook]. National Research Tomsk Polytechnic University. Tomsk: Tomsk polytechnic university Publ., 2010, 96 p.

7. Askadskii A.A., Khokhlov A.R. Vvedenie v fizikokhimiyu polimerov [Introduction to the Physicochemistry of Polymers]. Moscow: Nauchnyi mir Publ., 2009, 380 p.

8. Kryzhanovskii V.K., Burlov V.V. Prikladnaya fizika polimernykh materialov [Applied Physics of Polymer Materials]. St. Petersburg: SPbGTI(TU) Publ., 2001, 261 p.

9. Dul'skii E.Yu. Modelirovaniye rezhimov IK-energopodvoda v tekhnologii prodleniya resursa tyagovykh elektricheskikh mashin s ispol'zovaniem metoda konechnykh elementov [Modeling of IR energy supply modes in the technology of extending the life of traction electric machines using the finite element method]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University]*, 2013, No. 12 (83), pp. 258–263.

10. Aleksandrov A.A. Prognozirovaniye ostatochnykh napryazhenii voznikayushchikh pri termoob-rabotke alyuminievykh splavov [Prediction of residual stresses arising during the heat treatment of aluminum alloys]. *Inzhenernyi vestnik Dona [Engineering Journal of Don]*, 2015, No. 4 (38), pp. 128.

11. Aleksandrov A.A. Modelirovaniye termicheskikh ostatochnykh napryazhenii pri proizvod-stve malozhestkikh detalei: diss. ... kand. tekhn. nauk [Modeling of thermal residual stresses in the production of semi-rigid parts: a Ph.D. (Engineering) diss.]. Irkutsk: 2016, 165 p.

12. Howell John R., Robert Siegel R. Thermal Radiation Heat Transfer. Scientific and Technical Information Office. Washington, D.C., 1971. [Russ. Ed.: Zigel' R., Khauell Dzh. Teploobmen izlucheniem: per. s angl; Moscow: Mir Publ., 1975, 934 p.].

13. Burakovskii T., Gizin'skii E., Salya A. Infrakrasnye izluchately: per. s pol'sk. [Infrared emitters: Per. from Polish]. Leninograd: Energiya Publ., 1978, 408 p.].

14. Khudonogov A.M., Khudonogov I.A. et al. Lokal'nyi sposob germetizatsii kompaundom izolya-tsii lobovykh chastei obmotok tyagovykh elektricheskikh mashin [The local method of sealing the insulation of the frontal parts of the windings of traction electric machines with the compound]. Patent RF No. 2396669, 04.05.2009. Patent Rossii No. 2396669, Bull. No. 22.

15. Ivanov V.N. Elektrotekhnologicheskoe prodlenie resursa elektricheskikh mashin teplo-vym izlucheniem: dissertatsiya na soiskaniye uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Electrotechnological extension of the life of electric machines by thermal radiation: a Ph.D. (Engineering) diss.]. Moscow, 2014, 178 p.

16. Vasil'ev A.A. Sovershenstvovaniye tekhnologii depovskogo remonta vspomogatel'nykh elektricheskikh mashin elektro-poezdov: dissertatsiya na soiskaniye uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Improving the technology of depot repair of auxiliary electric machines of electric trains: a Ph.D. (Engineering) diss.]. Omsk, 2018, 137 p.

17. Lytkina E.M. Povysheniye effektivnosti kapsulirovaniya izolyatsii lobovykh chastei ob-motok tyagovykh dvigatelei EPS infrakrasnym izlucheniem: dissertatsiya na soiskaniye uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Improving the efficiency of encapsulation of the insulation of the frontal parts of the windings of the EPS traction engines with infrared radiation: a Ph.D. (Engineering) diss.]. Irkutsk, 2011, 205 p.

18. Olentsevich D.A. Sovershenstvovaniye sistemy tekhnicheskogo sodержaniya izolyatsii tyagovykh dvigatelei EPS: dissertatsiya na soiskaniye uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Improving the technical content of the insulation system for EPS traction engines: a Ph.D. (Engineering) diss.]. Irkutsk, 2010, 146 p.

19. Rummyantsev A.V. Metod konechnykh elementov v zadachakh teploprovodnosti: ucheb. posob. [The finite element method in heat conduction problems: a textbook]. Kaliningrad Un-ty Publ., Kaliningrad, 1995, 170 p.

20. Rummyantsev A.V. Metod konechnykh elementov v zadachakh teploprovodnosti: ucheb. po-sob. [The finite element method in heat conduction problems: a textbook]. 3<sup>rd</sup> ed., revised. Kant Russian State University Publ., Kaliningrad, 2010, 95 p.

21. Pykhalov A.A., Vysotskii A.V. Raschet sbornykh rotorov turbomashin s primeneniem negolonomnykh kontaktnykh svyazei i metoda konechnykh elementov [Calculation of prefabricated rotors of turbomachines using nonholonomic contact bonds and the finite element method]. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika [Compressor technology and pneumatics]*, 2003, No. 8, pp. 25.

### Информация об авторах

**Кручек Виктор Александрович** – д. т. н., профессор, профессор кафедры электрической тяги, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, e-mail: victor.kruchek@yandex.ru

**Худоногов Анатолий Михайлович** – д. т. н., профессор, профессор кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: a.hudonogov@yandex.ru

**Дульский Евгений Юрьевич** – к. т. н., доцент, доцент кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: E.Dulskiy@mail.ru

### Information about the authors

**Viktor A. Kruchek** – Doctor of Engineering Science, Professor of the Subdepartment of Electrical Traction, the Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, e-mail: victor.kruchek@yandex.ru

**Anatolii M. Khudonogov** – Doctor of Engineering Science, Professor of the Subdepartment of Electric Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: a.hudonogov@yandex.ru

**Evgenii Y. Dulskii** – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Subdepartment of Electric Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: E.Dulskiy@mail.ru