normalizing the work of locomotives and locomotive crews in freight traffic]. *Sbornik trudov pyatoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Intellektual'nye sistemy upravleniya na zheleznodorozhnom transporte. Komp'yuternoe i matematicheskoe modelirovanie» (ISUZhT-2016, Moskva, 17–18 noyabrya 2016 g).* [*Proceedings of the fifth scientific and technical conference with international participation "Intelligent control systems on railway transport. Computer and mathematical modeling" (ISUZT-2016, Moscow, November 17–18, 2016)*]. Moscow: NIIAS OAO Publ., 2016. Pp. 198–201.

21. Vlasov A.I., Echeistov V.V., Krivoshein A.I., Shakhnov V.A., Filin S.S., Migalin V.S. An information system of predictive maintenance analytical support of industrial equipment. *Journal of Applied Engineering Science,* 2018. Vol. 16. No. 4. Pp. 515–522.

Информация об авторах

Власов Андрей Игоревич – канд. техн. наук, доцент, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, e-mail: vlasovai@bmstu.ru

Подорин Александр Андреевич **–** аспирант, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, e-mail: alex@podorin.ru

Малеванный Артур Юрьевич – магистр, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, e-mail: artumall96@icloud.com

Рубцов Дмитрий Валерьевич – и. о. начальника отдела отделения эксплуатации железных дорог и взаимодействия транспортных систем, Институт экономики и развития транспорта, г. Москва, e-mail: dmitriy.rubtsov@gmail.com

Information about the authors

Andrei I. Vlasov **–** Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, e-mail: vlasovai@bmstu.ru

Aleksandr A. Podorin – Ph.D. student, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, e-mail: alex@podorin.ru

Artur Yu. Malevannyi – Master's Degree, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, e-mail: artumall96@icloud.com

Dmitrii V. Rubtsov **–** Deputy Head of the Department for Operation of Railways and Interaction of Transport Systems, Institute of Economics and Transport Development, Moscow, e-mail: dmitriy.rubtsov@gmail.com

DOI 10.26731/1813-9108.2020.3(67).108-116 **УДК** 621.33

Физика и техника упрочнения полимерного изоляционного материала электрических машин тепловым излучением

И. О. Лобыцин✉
Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация
✉ lobycin@mail.ru

Резюме

В статье рассматривается инфракрасное излучение с позиции совместимости воздействия тепловой энергии, генерируемой в излучателях различных типов, и полимерного электроизоляционного материала, применяемого в процессе изготовления или ремонта электрических машин тягового подвижного состава. Наглядно представлены результаты процесса локального нагрева коротковолновым, средневолновым и длинноволновым тепловым излучением образцов стеклослюдинитовых лент, пропитанных в жидких электроизоляционных полимерных лаках, широко используемых для изоляции обмоток электрических машин тягового подвижного состава. Произведен расширенный анализ физики и техники возникновения теплового излучения при использовании керамических излучателей, а также свойств и роли керамического покрытия в процессе образования импульсного узкополосного излучения и высокой скорости передачи тепла. С использованием классических уравнений Максвелла показана зависимость степени черноты от удельного сопротивления материала инфракрасного излучателя, а также от его температуры. С опорой на произведенные исследования получен результат использования наиболее эффективного генератора теплового инфракрасного излучения, который позволяет судить о том, что использование излучателей с низким удельным сопротивлением для восстановления электрической изоляции тел ведет к большим потерям электроэнергии, а значит энергетически неэффективно при интенсивном применении. Отмечен тот факт, что для этой цели подходят только инфракрасные излучатели со свойствами, приближенными к абсолютно черному телу, а именно керамические излучатели с затемненной поверхностью с фронтальной стороны и золотистым покрытием противоположной части. Рассмотрены перспективы развития технологии при использовании микродугового оксидирования, главным свойством которой является возможность регулирования параметров нагрева, а также возникновение модифицированных структур с особыми свойствами. Практическое применение теплового излучения в локомотивостроении позволит достичь идеально гладкой поверхности изоляционных конструкций, в частности, изоляционных пальцев кронштейнов щеткодержателей тяговых электродвигателей, что приведет к отсутствию микродефектов и пористостей, характерных для традиционной конвективной сушки.

Ключевые слова

инфракрасное излучение, изоляционный материал, электрические машины, тяговый подвижной состав, спектральные характеристики излучателя, изоляционный палец тягового электродвигателя, электрическая прочность, удельное сопротивление

 © И. О. Лобыцин, 2020

Для цитирования
Лобыцин И.О. Физика и техника упрочнения полимерного изоляционного материала электрических машин тепловым излучением // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3(67). – С. 108–116. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).108-116

Информация о статье
поступила в редакцию: 31.01.2020, поступила после рецензирования: 14.03.2020, принята к публикации: 07.07.2020

Physics and technology of strengthening of polymeric insulation material of electric machines using thermal radiation

I. O. Lobytsin✉
Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation
✉ lobycin@mail.ru

Abstract
This article is aimed at considering infrared radiation from the viewpoint of compatibility of the impact of thermal energy generated in various types of emitters and polymer insulating material used during the manufacture or repair of electrical machines of traction rolling stock. The results of the local heating process with short-wave, medium-wave, and long-wave heat radiation of samples of glass-and-mica tapes impregnated in liquid electrical insulating polymer varnishes widely used for insulation of windings of electrical machines of traction rolling stock are clearly described. The physics and technology of the occurrence of thermal radiation using ceramic emitters, as well as the properties and role of a functional ceramic coating during the formation of pulsed narrow-band radiation and a high heat transfer rate, are extensively analyzed. The dependence of the emissivity factor on the specific resistivity of the material of the infrared emitter, as well as on its temperature, is shown using classical Maxwell's equations. On the basis of the studies performed, the result of using the most efficient thermal infrared radiation generator is obtained. This allows us to judge that the application of emitters with low resistivity to restore the electrical insulation of bodies results in large losses of electricity, which means it is energetically inefficient when used intensively. It is noted that only infrared emitters with properties close to a completely black body are suitable for this purpose, namely, ceramic emitters with a darkened surface on the front side and a golden coating on the opposite side. The prospects for the development of the technology using the technology of microarc oxidation, the main property of which is the possibility of regulating the heating parameters, as well as the emergence of modified structures with special properties, are considered. The practical application of thermal radiation in locomotive engineering will make it possible to achieve a perfectly smooth surface of insulating structures, particularly, insulating fingers of the support brackets of the brush holders of traction electric motors. As a result of which, there will be no microdefects and porosities that are characteristic of traditional convective drying.

Keywords
infrared radiation, insulating material, electrical machines, traction rolling stock, spectral characteristics of the emitter, insulating finger of traction electric motor, electric strength, specific resistivity

For citation
Lobytsin I.O. Fizika i tekhnika uprochneniya polimernogo izolyatsionnogo materiala elektricheskikh mashin teplovym izlucheniem [Physics and technology of strengthening of polymeric insulation material of electric machines using thermal radiation]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [*Modern Technologies. System Analysis. Modeling*], 2020, No. 3(67), pp. 108–116. 10.26731/1813-9108.2020.3(67).108-116

Article info
Received: 31.01.2020, Revised: 14.03.2020, Accepted: 07.07.2020

Введение

Физическая сущность инфракрасного (ИК) обогрева или нагрева состоит в передаче тепловой энергии в виде электромагнитного излучения от источника излучения непосредственно на обогреваемый или нагреваемый объект без подогрева окружающего воздуха. Высокая энергоэффективность может быть достигнута в результате согласования интегральных характеристик ИК-облучателей и оптических свойств нагреваемых объектов. Технологический процесс должен быть построен при максимальном поглощении энергии электромагнитного (теплового) излучения объектом при минимальных значениях отражения и пропускания этого излучения [1].

Значительные исследования по изучению и согласованию характеристик современных инфракрасных излучателей применительно к разработке облучателей для обогрева людей и животных в рабочих и жилых помещениях проведены сотрудниками фирмы «Номакон» [2]. Методический подход к исследованиям может быть использован и при решении задач, связанных с нагревом полимеров в

технологиях изготовления и восстановления изоляционных конструкций электрооборудования.

В настоящее время на отечественном рынке представлен широкий спектр наиболее надежных электрических ИК-излучателей, рекомендуемых для нагрева материалов и обогрева помещений. Однако перед началом проектирования генераторов теплового излучения для технологии изготовления и ремонта изоляционных конструкций электрооборудования тягового подвижного состава необходимо провести предварительные литературные и лабораторные исследования с целью согласования спектрального и интегрального состава теплового излучения с оптическими и цементирующими свойствами пропиточных материалов (жидких полимеров).

Анализ спектральных характеристик керамических инфракрасных излучателей

Характеристики современных отечественных ИК-излучателей были получены в результате экспериментальных исследований и расчетов сотрудниками фирмы «Номакон». Согласно стандарту DIN 5031 в зависимости от диапазонов по длине волны выделяют три области ИК-излучения:

– ближнюю IR-A (0,75–1,4 мкм);
– среднюю IR-B (1,4–3,0 мкм);
– дальнюю IR-C (3,0–8,0 мкм).

При этом наибольшее проникновение излучения в жидкие полимеры наблюдается в диапазоне 1,5–3,0 мкм, данный диапазон имеет название окно прозрачности лучевого ИК- нагрева.

Большая часть отечественных и зарубежных электрических керамических излучателей при номинальных режимах выдают ИК-излучение в средней области. Так, например, при анализе интегральной характеристики излучателя типа ECS спектральный состав излучения распределяется следующим образом: IR-A – 18,3 %, IR-B – 63,5 %, IR-C – 18,2 %, что свидетельствует о высокой эффективности средневолнового излучения [3, 4].

Спектральные характеристики (рис.1) керамических средневолновых ИК-излучателей типа ECS-2 мощностью 400, 650 и 1 000 Вт, полученные сотрудниками фирмы «Номакон», отражают пиковые значения плотности мощности на определенном диапазоне длины волны, независимо от подаваемой мощности.

Переход на аналогичные излучатели в технологиях нагрева жидких полимеров сулит значительный эффект за счет повышения таких энергетических показателей, как коэффициент излучения (степень черноты) и коэффициент эмиссии электрической энергии в энергию инфракрасного излучения (лучевой КПД).

Типичные кривые спектрального распределения коэффициента пропускания (рис. 2), для пленки мочевиноформальдегидного лака, беспрепятственно пропускающей ИК-излучение, позволяет произвести сравнительный анализ излучателей на эффективность пропускания тепловой энергии в зависимости от применяемого в изготовлении излучателей материала [5].

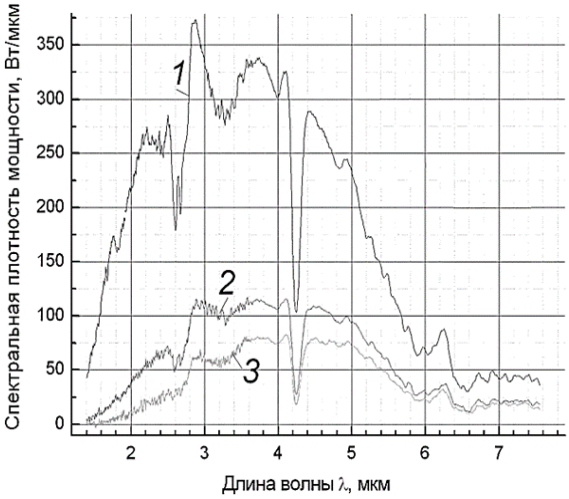
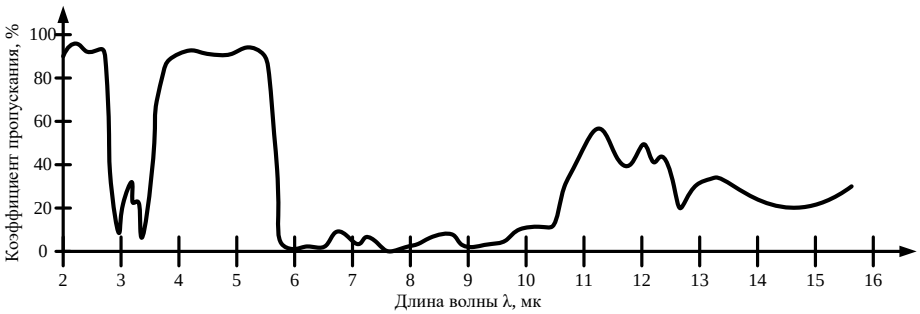


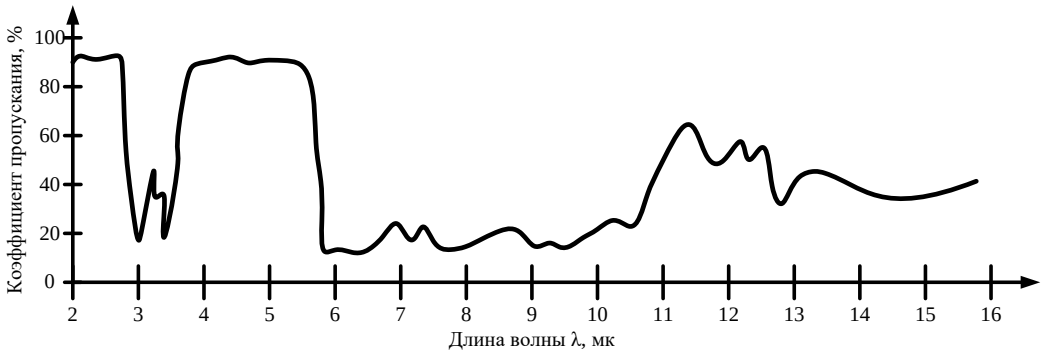
Рис. 1. Спектральная характеристика средневолнового инфракрасного излучателя:
1 – тип ECS-2 (400 Вт); *2* –тип ECS-2 (650 Вт); *3* –тип ECS-2 (1 000 Вт).

Fig. 1. Spectral characteristic of the mid-wave infrared emitter:
1 – ECS-2 type (400 W); *2* – ECS-2 type (650 W); *3* – ECS-2 type (1000 W)



а

 © И. О. Лобыцин, 2020



б

Рис. 2. Спектральное пропускание мочевиноформальдегидной пленки, отвержденной в различных печах:
а – со «светлым» инфракрасным излучателем; *б* – с «темным» инфракрасным излучателем
Fig. 2. Spectral transmittance of an urea-formaldehyde film cured in different ovens:
a – with a "light" infrared emitter; *b* – with a "dark" infrared emitter

Кривые относятся к одному и тому же используемому лаку при сушке «светлым» и «темным» ИК-излучателем (см. рис. 2). Как видно, пропускание ИК-излучения очень хорошее, но при этом для излучений с длиной волны 3–4 мкм оно мгновенно понижается, и затем вновь возрастает до высокого значения для длин волн порога более 4 и 6 мкм. Последующий ход представленных кривых в области длин волн более 6 мкм не подлежит рассмотрению, так как интенсивность излучения используемых ИК-излучателей в этой области очень мала.

За исключением некоторых частностей направление спектральных кривых большинства пленкообразующих веществ, например, лаковой пленки, подобен описанному [6–8]. Лаки такого характера высушиваются при воздействии на них «светлого» излучения по причине высокого поглощения «светлого» излучения подложкой, выполненной из металла.

Излучение «темное» имеет лучшее пропускание сквозь прозрачный светлый (не пигментированный) слой изоляционного лака и поглощается подложкой, что в свою очередь способствует сушке слоя изнутри, т. е. возникают наиболее благоприятные условия протекания процесса сушки. По данной причине, когда подложка лакового слоя имеет низкую отражательную способность (листы черного железа), можно отдать предпочтение «темному» излучению, что наиболее подходит в процессе ремонта изоляционных конструкций электрических машин электроподвижного состава.

Сравнительный анализ излучателей генерирующих «светлое» и «темное» ИК-излучение был проведен в сопоставимых условиях, на основании которых сделано следующее заключение: результаты испытаний, сравнительная оценка характеристик излучателей, а также анализ критериев выбора различных видов нагревателей показывают, что наиболее перспективными для направленного лучевого нагрева жидких полимеров в производственных условиях являются керамические излучатели, покрытые черной глазурью с позолотой с обратной стороны (рис. 3).

Рис. 3. Керамический инфракрасный излучатель, покрытый черной глазурью с позолотой
Fig. 3. Ceramic infrared emitter covered with black glaze with gold plating

Спектральная и интегральная степень черноты инфракрасных излучателей

Технологические и оптические характеристики пропиточных составов хорошо представлены в диссертации Е.М. Лыткиной. В работе проанализирована продукция отечественных фирм, специализирующихся на производстве пропиточных материалов [9, 10]. Программой лабораторных экспериментальных исследований предусматривалось изучение процессов нагрева тепловым излучением (длинноволновым, средневолновым, коротковолновым) пропитанных в различных жидких полимерах образцов изоляционных слюдинитовых лент.

Результаты проведенного эксперимента по определению электрической прочности изоляционного материала (рис. 4), пропитанного электроизоляционным лаком ФЛ-98 и компаундами марок ВЗТ-1, ПК-11 в процессе локального нагрева различными

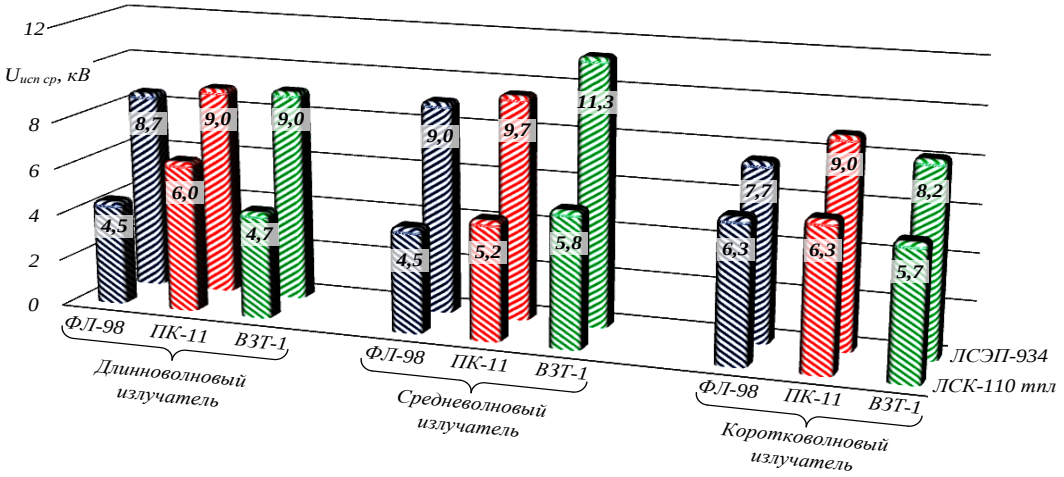


Рис. 4. Гистограмма результатов измерения электрической прочности изоляционных материалов после полимеризации тепловым излучением
Fig. 4. Histogram of the results of measuring the dielectric strength of insulating materials after polymerization by means of thermal radiation

видами ИК-излучателей позволили определить, что наибольшую электрическую прочность имеет изоляционная лента типа ЛСЭП-934, облученная средневолновым керамическим ИК-излучателем с пропиткой в компаунде ВЗТ-1. Такой результат был прогнозируем, так как ранее проведенные сравнительные экспериментальные исследования в двух ИК-излучателях одинаковой мощности, но с различным конструктивным исполнением, указали на существенное их различие по КПД.

С тех пор прошло более десяти лет и на рынке появились новые ИК-излучатели и пропиточные материалы. Более того, появились новые гипотезы по физике и технике теплового излучения с использованием композитных излучателей, сформированных из материалов с различной атомно-молекулярной структурой и новой технологией их изготовления. Большой объем работ по конструированию импульсных преобразователей излучения с применением смеси современных композитных материалов с функциональной керамикой был выполнен под руководством Р.Х. Рахимова, который предположил, что керамическое покрытие преобразовывает весь спектр ИК-излучения, испускаемого тепловыми генераторами, в излучение крайне узкого диапазона ближней области ИК-спектра излучения. Кроме того, испускаемое излучение имеет импульсный скачкообразный характер с периодическими импульсами длительностью 10–3 000 мкс, что отличается от предполагаемого ранее непрерывного энергоподвода [11]. Этот фактор позволяет достичь относительно высокой плотности генерируемой тепловой энергии в каждом импульсе, которая составляет примерно 120–350 Вт/см^2.

Стоит отметить тот фактор, что импульсное преобразование тепловой энергии возникает из-за циклических энергетических превращений, которые неизменно происходят в системе. Отличительной особенностью подобных систем, на наш взгляд, является наличие заряженных частиц D типа, особенностью которых является переменная валентность. При этом основная матрица проявляет свойства полупроводника и формирует ширину спектрального пика импульса.

Данного рода системы обладают определенным исходным энергетическим потенциалом, в случае прохождения электрического тока в цепи, происходит поглощение энергии ИК-спектра, накапливая и применяя ее в дальнейшем для увеличения собственного энергетического состояния, в том числе и активизации своей электронной структуры. Молниеносный импульсный выброс энергии теперь осуществляется в момент полного достижения уровня энергетического насыщения, при этом сама система переходит в исходное состояние. Достижение относительно высокого показателя коэффициента полезного действия обеспечивается путем получения ширины спектрального пика, который находится в диапазоне 1–2,5 % от испускаемой длины волны.

На основании этого функциональное покрытие импульсных керамических излучателей тепловой энергии является перестраиваемым по длине волны лазерным источником (в зависимости от количества той или иной стабилизирующей добавки). Верхний слой керамического покрытия на излучателе позволяет полностью абсорбировать излучение в диапазоне ИК-волн, аккумулирует, преобразует, в заключительной фазе полностью «выстреливает» узкополосным излучением в необходимой области заданного спектра [12]. При этом наблюдаются длины волн, расположенные в широком диапазоне 1,7–5,8

 © И. О. Лобыцин, 2020

мкм, а это позволяет выполнять избирательное воздействие на молекулярные связи в различных веществах с любыми агрегатными состояниями, по причине нахождения частоты колебаний всех межмолекулярных и межатомных связей молекул в одинаковом диапазоне волн.

Говоря о преимуществах, также можно отметить способность подобного рода теплового излучения, имеющего определенную длину волны и мощность, вызывать нестабильность в молекулярных связях биоорганических и органических молекул, ведущих к полному распаду. Микроорганизмы, споры, грибки и вирусы подвергаются тотальному уничтожению, а скорость передачи тепла от источника к объекту превышает показатели любого современного типа нагревателей более чем в 30 раз.

Подбор испускаемой длины волны и мощности излучения для конкретного пропиточного изоляционного состава, есть одна из важнейших задач, требующая скорейшего решения. В данном случае целесообразно обратиться к классическим уравнениям Максвелла, которые описывают явления электромагнетизма [13, 14].

В работах предшественников не уделялось должного внимания влиянию степени черноты различных типов ИК-излучателей на процесс отверждения изоляционного полимера. Низкий расход электроэнергии в совокупности с высокой эффективностью нагрева достигаются только в том случае, если будут учитываться такие показатели, как степень излучения и температура нагрева излучателя.

При проведении практических и лабораторных исследований было доказано, что два источника ИК-тепловой энергии при идентичной температуре на поверхности будут обладать различными показателями эффективности, а также оказывать влияние на облучаемое электроизоляционное вещество, которым является лак или компаунд. Теоретически эти отличия возможно обосновать, опираясь на классическую электромагнитную теорию, позволяющую определить степень черноты тепловых генераторов при помощи электрических свойств.

В результате решения уравнений Максвелла, при исследовании магнитных и электрических свойств используемого вещества возникает возможность незатруднительного определения показателя поглощения и показателя преломления. Данные показатели определяются с применением следующих формул:

$$n^2 = \frac{\mu \cdot \gamma \cdot C_0^2}{2} \cdot \left\{ 1 + \left[1 + \left(\frac{\lambda_0}{2\pi \cdot C_0 \cdot r_e \cdot \gamma} \right)^2 \right]^{1/2} \right\},$$

$$x^2 = \frac{\mu \cdot \gamma \cdot C_0^2}{2} \cdot \left\{ -1 + \left[1 + \left(\frac{\lambda_0}{2\pi \cdot C_0 \cdot r_e \cdot \gamma} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}.$$

В том случае, если для изготовления ИК-излучателя применяются полупроводники и металлические составляющие, удельное сопротивление которых очень низкое в сравнении диэлектриками, то при значительно высоких показателях длины волны величина $\frac{\lambda_0}{2\pi \cdot C_0 \cdot r_e \cdot \gamma}$ становится определяющим параметром, при этом магнитная проницаемость среды принимается равной μ_0, а выражение преобразуется в следующую формулу:

$$n = x = \sqrt{\frac{\lambda_0 \cdot \mu_0 \cdot C_0}{4\pi \cdot r_e}} = \sqrt{\frac{30 \cdot \lambda_0}{r_e}},$$

где μ – абсолютная магнитная проницаемость среды (Гн/м); γ – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды (Гн/м); C_0 – скорость электромагнитной волны в вакууме (м/с); λ_0 – длина волны в вакууме (м); r_e – удельное сопротивление излучателя (Ом·м).

Если λ_0 измерять в мкм, а r_e – Ом·см, выражение принимает вид формулы Хагена – Рубенса:

$$n = x = \sqrt{\frac{0{,}003 \cdot \lambda_0}{r_e}}.$$

При падении электромагнитных волн на облучаемую среду, которая будет полностью поглощать ее, получим формулу:

$$\rho'_{\lambda,n}(\lambda) = \frac{(n_2 - 1)^2 + x_2^2}{(n_2 + 1)^2 + x_2^2},$$

где $\rho'_{\lambda,n}$ – отражательная способность. Подстрочные индексы: 0 – вакуум; 1, 2 – среда 1 или 2.

Принимая во внимание, что $n = x$, получаем выражение, подходящее для расчета степени черноты у веществ с показателем преломления n, излучающего в направлении нормали вакуум или воздух:

$$\epsilon_{\lambda,n}(\lambda) = 1 - \rho'_{\lambda,n}(\lambda) = 1 - \frac{2n^2 + 2n - 1}{2n^2 + 2n + 1}.$$

Совмещая представленные уравнения, получим выражение определения спектральной степени черноты в направлении нормали, известное как формула Хагена – Рубенса для расчета степени черноты:

$$\epsilon_{\lambda,n}(\lambda) = 1 - \rho'_{\lambda,n}(\lambda) = 1 - (1 - 2/n) = \frac{2}{\sqrt{0{,}003 \cdot \lambda_0 / r_e}}.$$

Выполнив интегрирование спектральной степени черноты в направлении нормали по всем отдельным длинам волн, получаем уравнение, определяющее интегральную степень черноты в направлении нормали:

$$\epsilon_{\lambda,n}(T) = 0{,}0347 \cdot \sqrt{r_{e,273} \cdot T},$$

где $r_{e,273}$ – удельное сопротивление при 273°К (Ом·см); T – температура (К).

На основании представленных выражений можем сделать вывод, что как интегральная, так и спектральная степень черноты, зависят от величины удельного сопротивления конструктивного материала, из которого изготовлен генератор тепловой энергии [15]. Следовательно, чем выше удельное сопротивление материала, тем более высокую степень черноты имеет показатель, и наоборот. К тому же, необходимо отметить зависимость интегральной степени черноты от поверхностной температуры нагрева ИК-излучателя.

Данное суждение было получено с опорой на законы классической электромагнитной теории и представляет высокую практическую значимость в процессе выполнения анализа взаимодействия системы «генератор тепловой энергии – газовая среда – электроизоляционный материал» в технологических процессах по восстановлению изоляции силового и вспомогательного оборудования тягового подвижного состава.

Если в конструкции излучателя применяется нагревательный элемент с относительно низким показателем удельного электрического сопротивления и малой степенью черноты, то увеличивается вероятность повышения потерь потребляемой электроэнергии, а это негативно влияет на экономический эффект процесса облучения. В подобного рода случае необходимо и достаточно использовать ИК-излучатели, имеющие в своей конструкции тела накала с высокими радиационными свойствами, к которым относятся различного вида керамические излучатели, излучатели, выполненные на основе фарфора, пленочные полупроводниковые излучатели, слюдопластовые и карбоновые излучатели. Физические свойства подобного рода излучателей, благодаря конструкции наружной поверхности, приближаются к абсолютно черному телу, степень излучения которого численно равняется 1. Повышение эффекта можно ожидать при использовании керамических генераторов ИК-излучения нового поколения, нагревательный элемент которых изготовлен по технологии микродугового оксидирования (МДО). Суть данной технологии состоит в нанесении на поверхность металла тонкого слоя керамики, но при этом речь идет не о простом покрытии поверхности одного вещества другим веществом. При МДО происходит образование металлокерамической молекулярной решетки, т. е. по сути образуется совершенно новое вещество – металлокерамика, к тому же обладающее совершенно уникальными свойствами, характерными одновременно для металла и керамики [16, 17].

Заключение

С помощью особых свойств ИК-излучателей открывается путь к регулированию интенсивности и глубины нагрева, а также возникновение или изменение модифицированных структур и придаваемой функциональности полимеру при переходе его из жидкой фазы в твердую. При модификации полимера с помощью теплового излучения интенсивность и дозовые характеристики потока лучистой энергии более существенны, чем при модификации с помощью обычных массовых тепловых источников нагрева, в связи с этим в ряде случаев необходим учет порогов энергетических значений по интенсивности и дозе для конкретных образцов. Возникает интерес к созданию функциональной стойкости полимерных материалов к действию мощного некогерентного и когерентного ИК-излучения, нужно принять во внимание кинетические и химические аспекты возникновения и развития модифицированных структур, приводящих к данным свойствам, для различных классов полимеров [18–20]. В большей степени важен факт возможности образования градиентных структур с негомогенными физико-химическими характеристиками по толщине образца. Модификация полимера тепловым излучением, полученная от источников нового поколения, образует необратимые модифицированные структуры и соответствующие функциональные характеристики. Модификация электроизоляционных материалов сверхкритическими средами – новый, многообещающий и активно изучаемый в настоящее время процесс, который может самостоятельно или в комбинации с другими способами вести к возникновению или изменению модифицированных структур и приданию изделиям функциональностей различных типов, например, идеальной шероховатости поверхности изоляционных пальцев кронштейнов щеткодержателей электрических машин тягового подвижного состава.

Список литературы

1. Худоногов А.М., Лыткина Е.М., Дульский Е.Ю. Критерий обоснованности выбора пропиточного материала в технологии ремонта тяговых электрических машин подвижного состава // Повышение тягово-энергетической эффективности и надежности электроподвижного состава : межвуз. темат. сб. науч. тр. Омск : Изд-во ОмГУПС, 2013. С. 38–43.
2. Инфракрасные керамические нагревательные элементы (излучатели) // Номакон-Евролиния : сайт. URL: http://www.nomacon.by/ik/ich-101.php (дата обращения 13.05.2019).
3. Принципы управления энергоподводом в процессах удаления влаги из изоляции обмоток тяговых электрических машин // А.М. Худоногов, В.П. Смирнов, Д.В. Коноваленко и др. // Энергосбережение: технологии, приборы, оборудование : сб. науч. тр. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2009. С. 125–129.

 © И. О. Лобыцин, 2020

4. Лобыцин И.О., Худоногов А.М., Дульский Е.Ю. Терморадиационное восстановление малогабаритных изоляционных элементов тяговых электродвигателей локомотивов // Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта : материалы третьей междунар. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Омск : Изд-во ОмГУПС, 2018. С. 236–243.

5. Дульский Е.Ю., Худоногов А.М., Лыткина Е.М. Влияние химических свойств полимеров и режимов ИК-энергоподвода на прочность и пластичность изоляции в локальных технологиях продления ресурса электрических машин тягового подвижного состава // Изв. Транссиба. 2015. № 1 (21). С. 6–11.

6. Худоногов А.М. Тепловой баланс и пути повышения тепловой экономичности радиационной сушилки // Улучшение эксплуатации и ремонта сельскохозяйственной техники. Иркутск, 1973. С. 84–88.

7. Анализ конструктивных особенностей элементов электромагнитной системы тяговых электродвигателей локомотивов / А.М. Худоногов, Е.Ю. Дульский, В.Н. Иванов и др. //Транспортная инфраструктура Сибирского региона : материалы девятой междунар. науч.-практ. конф. В 2 т. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2018. Т. 2. С. 351–355.

8. Лыков А.В. Тепло и массообмен в процессах сушки. М. : Госэнергоиздат, 1956. 464 с.

9. Исмаилов Ш.К. Тепловое состояние тяговых и вспомогательных электрических машин электровозов постоянного и переменного тока. Омск : Изд-во ОмГУПС, 2001. 76 с.

10. Прищеп Л.Г., Филаткин П.Л. Исследование ультрафиолетовых и инфракрасных лучей: учеб пособ. // Электрический привод и применение электроэнергии в сельском хозяйстве. М., 1980. С. 90–97.

11. Бураковский Т. Гизиньский Е., Саля А. Инфракрасные излучатели : пер. с польск. Л. : Энергия, 1978. 408 с.

12. Иванов П.Ю. Мануилов Н.И., Дульский Е.Ю. Причины самопроизвольного срабатывания автотормозов в грузовых поездах // Изв. Транссиба. 2017. № 2 (30). С. 17–25.

13. Рахимов Р.Х., Саидов М.С., Ермаков В.П. Особенности синтеза функциональной керамики с комплексом заданных свойств радиационным методом. Ч. 5. Механизм генерации импульсов функциональной керамикой // Computational nanotechnology. 2016. № 2. С. 82-93.

14. Лебедев П.Д. Сушка инфракрасными лучами. М. : 1955. 232 с.

15. Гуревич В.З. Энергия невидимого света. М. : Наука, 1973. 142 с.

16. Борхерт Р., Юбиц В. Техника инфракрасного нагрева. М. : Энергоиздат, 1963. 278 с.

17. Лебедев П.Д. Расчет и проектирование сушильных установок. М. : Энергоиздат, 1963. 320 с.

18. Дульский Е.Ю. Анализ пространственного распределения инфракрасного излучения в процессе капсулирования изоляции электрических машин тягового подвижного состава // Вестн. ИрГТУ. 2013. № 7 (78). С. 132–136.

19. Дульский Е.Ю. Совершенствование технологии ремонта магнитной системы тяговых двигателей электровозов // Вестн. ИрГТУ. 2012. № 4 (63). С. 103–108.

20. Дульский Е.Ю. Моделирование режимов ИК-энергоподвода в технологии продления ресурса тяговых электрических машин с использованием метода конечных элементов // Вестн. ИрГТУ. 2013. № 12 (83). С. 258–263.

References

1. Khudonogov A.M., Lytkina E.M., Dul'skii E.Yu. Kriterii obosnovannosti vybora propitochnogo materiala v tekhnologii remonta tyagovykh elektricheskikh mashin podvizhnogo sostava [The criterion for the validity of the choice of impregnating material in the technology of repair of traction electrical machines of rolling stock]. *Povyshenie tyagovo-energeticheskoi effektivnosti i nadezhnosti elektropodvizhnogo sostava: Mezhvuz. temat. sb. nauch. tr.* [*Increase of traction and energy efficiency and reliability of electric rolling stock: Interuniversity theme-based proceedings*]. Omsk state transport un-ty. Omsk, 2013. Pp. 38–43.

2. Infrakrasnye keramicheskie nagrevatel'nye elementy (izluchateli). OOO Nomakon-Yevroliniya: Razrabotka, proektirovanie i proizvodstvo nauchno-tekhnicheskoi produktsii [Infrared ceramic heating elements (emitters). LLC Nomakon-Euroline: Development, design and production of scientific and technical products] [Electronic media]. URL: http://www.nomacon.by/ik/ich-101.php (Accessed 13.05.2019).

3. Khudonogov A.M., Smirnov V.P., Konovalenko D.V., Gamayunov I.S. et al. Printsipy upravleniya energopodvodom v protsessakh udaleniya vlagi iz izolyatsii obmotok tyagovykh elektricheskikh mashin [Principles of energy supply control in the processes of moisture removal from insulation of windings of traction electric machines]. *Energosberezhenie: tekhnologii, pribory, oborudovanie: sb. nauchn. trudov* [*Energy saving: technologies, devices, equipment: Proceedings*]. In A.V. Kryukov (ed.) Irkutsk: IrGUPS Publ., 2009. Pp. 125–129.

4. Lobytsin I.O., Khudonogov A.M., Dul'skii E.Yu. Termoradiatsionnoe vosstanovlenie malogabaritnykh izolyatsionnykh elementov tyagovykh elektrodvigatelei lokomotivov [Thermoradiation restoration of small-sized insulating elements of traction electric motors of locomotives]. *Razrabotka i ekspluatatsiya elektrotekhnicheskikh kompleksov i sistem energetiki i nazemnogo transporta: Materialy tret'yei mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [*Development and operation of electrical complexes and systems of energy and land transport: Proceedings of the third international scientific and practical conference with international participation*]. Omsk state transport un-ty. Omsk, 2018. Pp. 236–243.

5. Dul'skii E.Yu., Khudonogov A.M., Lytkina E.M. Vliyanie khimicheskikh svoistv polimerov i rezhimov IK-energopodvoda na prochnost' i plastichnost' izolyatsii v lokal'nykh tekhnologiyakh prodleniya resursa elektricheskikh mashin tyagovogo podvizhnogo sostava [Influence of the chemical properties of polymers and modes of IR energy supply on the strength and plasticity of insulation in local technologies for extending the service life of electric machines of traction rolling stock]. *Izvestiya Transsiba* [*Journal of Transsib Railway Studies*]. Omsk state transport un-ty. Omsk, 2015. No. 1 (21). Pp. 6–11.

6. Khudonogov A.M. Teplovoi balans i puti povysheniya teplovoi ekonomichnosti radiatsionnoi sushilki [Heat balance and ways of increasing the thermal efficiency of the radiation dryer]. *Uluchshenie ekspluatatsii i remonta sel'skokhozyaystvennoi tekhniki* [*Improving the operation and repair of agricultural machinery*], Irkutsk, 1973. Pp. 84–88.

7. Khudonogov A.M., Dul'skii E.Yu., Ivanov V.N., Lobytsin I.O. Analiz konstruktivnykh osobennostei elementov elektromagnitnoi sistemy tyagovykh elektrodvigatelei lokomotivov [Analysis of the design features of the elements of the electromagnetic system of traction electric motors of locomotives]. *Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona: Materialy devyatoi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii 10–13 aprelya 2018 g. Irkutsk: v 2 t.* [*Transport infrastructure of the Siberian region: Materials of the ninth international scientific and practical conference April 10-13, 2018 Irkutsk: in 2 volumes*]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2018. Vol. 2. Pp. 351–355.

8. Lykov A.V. Teplo i massoobmen v protsessakh sushki [Heat and mass transfer in drying processes]. Moscow: Gosenergoizdat Publ., 1956. 464 p.

9. Ismailov Sh.K. Teplovoe sostoyanie tyagovykh i vspomogatel'nykh elektricheskikh mashin elektrovozov postoyannogo i peremennogo toka [Thermal state of traction and auxiliary electric machines of DC and AC electric locomotives]. Omsk: OmGUPS Publ., 2001. 76 p.

10. Prishchep L.G., Filatkin P.L. Issledovanie ul'trafioletovykh i infrakrasnykh luchei: ucheb posobie [Study of ultraviolet and infrared rays: a textbook]. *Elektricheskii privod i primenenie elektroenergii v sel'skom khozyaystve* [*Electric drive and the use of electricity in agriculture*]. Moscow, 1980. Pp. 90–97.

11. Burakovskii T., Gizin'skii Ye., Salya A. Infrakrasnye izluchateli [Infrared emitters]. Transl. from Polish. Leningrad: Energiya Publ., 1978. 408 p.

12. Ivanov P.Yu., Manuilov N.I.,. Dul'skii E.Yu Prichiny samoproizvol'nogo srabatyvaniya avtotormozov v gruzovykh poyezdakh [Causes of spontaneous operation of automatic brakes in freight trains]. *Izvestiya Transsiba* [*Journal of Transsib Railway Studies*], 2017. No. 2 (30). Pp. 17–25.

13. Rakhimov R.Kh., Saidov M.S., Yermakov V.P. Osobennosti sinteza funktsional'noi keramiki s kompleksom zadannykh svoystv radiatsionnym metodom. Part 5. Mekhanizm generatsii impul'sov funktsional'noi keramikoi [Features of the synthesis of functional ceramics with a set of specified properties by the radiation method. Part 5. Mechanism of generation of pulses by functional ceramics]. *Computational nanotechnology*, 2016. No. 2.

14. Lebedev P.D. Sushka infrakrasnymi luchami [Drying by infrared rays]. Moscow, 1955.

15. Gurevich V.Z. Energiya nevidimogo sveta [Energy of invisible light]. Moscow: Nauka Publ., 1973. 142 p.

16. Borkhert R., Yubits V. Tekhnika infrakrasnogo nagreva [Technique of infrared heating]. Transl from German. In Levitin I.B. (ed.) Moscow: State power engineering Publ., 1963. 278 p.

17. Lebedev P.D. Raschet i proektirovanie sushil'nykh ustanovok [Calculation and design of drying plants]. Moscow: State power engineering Publ., 1963. 320 p.

18. Dul'skii E.Yu. Analiz prostranstvennogo raspredeleniya infrakrasnogo izlucheniya v protsesse kapsulirovaniya izolyatsii elektricheskikh mashin tyagovogo podvizhnogo sostava [Analysis of the spatial distribution of infrared radiation in the process of encapsulating the insulation of electric machines of traction rolling stock]. *Vestnik IrGTU* [*Proceedings of Irkutsk State Technical University*]. In Golovnykh I.M. et al. (eds.) Irkutsk: IrGTU Publ., 2013. No. 7 (78). Pp. 132–136.

19. Dul'skii Ye.Yu. Sovershenstvovanie tekhnologii remonta magnitnoi sistemy tyagovykh dvigatelei elektrovozov [Improvement of the technology of repair of the magnetic system of traction motors of electric locomotives]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [*Proceedings of Irkutsk State Technical University*], 2012. No. 4 (63). Pp. 103–108.

20. Dul'skii Ye.Yu. Modelirovanie 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 service life of traction electrical machines using the finite element method]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [*Proceedings of Irkutsk State Technical University*], 2013. No. 12 (83). Pp. 258–263.

Информация об авторах

Лобыцин Игорь Олегович – аспирант кафедры электроподвижного состава, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: lobycin@mail.ru

Information about the authors

Igor' O. Lobytsin – Ph.D. student, the Subdepartment of Electric Stock, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: lobycin@mail.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2020.3(67).116-125 **УДК** 621.311: 621.331

Моделирование электромагнитных влияний тяговых сетей на трубопроводы при сложных траекториях сближения

А. В. Крюков [1, 2]✉, А. В. Черепанов [1], А. Е. Крюков [1]

[1] *Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

[2] *Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация*

✉ and_kryukov@mail.ru

Резюме

Цель представленных в статье компьютерных исследований состояла в разработке методики моделирования электромагнитных влияний тяговых сетей железных дорог переменного тока на трубопроводы, проложенные на поверхности земли. Рассмотрены ситуации, отвечающие сложным траекториям сближения трубопроводов с трассами железных дорог. Моделирование выполнялось в программном комплексе «Fazonord», разработанном в Иркутском государственном университете путей сообщения. В этом комплексе формируется решетчатая схема замещения многопроводной системы путем использо-

 © А. В. Крюков, А. В. Черепанов, А. Е. Крюков, 2020