

УДК 621.315

А.С. Зыков, Н.М. ТруфановаПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ
МУФТОВОГО КАБЕЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ И ЕГО ВЛИЯНИЯ
НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ**

Прокладка силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ осуществляется в грунт или кабельные каналы, во время прокладки возникает необходимость в соединении двух строительных длин кабелей. Соединение совершается при помощи соединительной муфты. Конструкция муфты аналогична конструкции кабеля, но радиально имеет большие размеры по следующим причинам: болтовое соединение жил и большие толщины изоляции. При протекании номинального тока через жилу выделяется тепло согласно закону Джоуля-Ленца. Проводимость болтового соединения ниже проводимости жилы, а также муфта имеет большее тепловое сопротивление, чем кабель. В данной статье с учетом сделанных допущений и граничных условий разработана трехмерная математическая модель процессов теплопереноса и электромагнетизма в кабельной линии в условиях прокладки кабеля с соединительной муфтой в земле. Численная реализация поставленной математической модели осуществлялась с помощью метода конечных элементов в одном из программных пакетов ANSYS в среде Fluent. Произведен анализ работы кабельной линии и муфты кабеля марки ПвП 1×400 на постоянное напряжение 10 кВ. В результате численного решения были определены температурные поля в муфтовом соединении силового кабеля и окружающей среде. В результате анализа полученных результатов распределения температурных полей были определены оптимально допустимые токовые нагрузки.

Ключевые слова: муфта, силовой кабель, распределение температурного поля.

A.S. Zykov, N.M. Trufanova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**NUMERICAL EVALUATION OF THE TEMPERATURE FIELD
OF THE CABLE COUPLING AND ITS EFFECT
ON THE CABLE LINE CAPACITY**

Laying of power cables with XLPE insulation for 10 kV is carried out in the ground or cable channels, during laying in connection of two cable lengths. The connection is made by means of a coupling. The design of the coupling is similar to the cable design, but radially large in size for the following reasons: bolted connection of the conductors and large insulation thicknesses. When the rated current flows through the core, heat is released according to the Joule-Lenz law. The conductivity of the bolted joint is lower than the conductivity of the core, and also the coupling has a greater thermal resistance than the cable. In this

article, taking into account the assumptions made and the boundary conditions, a three-dimensional mathematical model of the processes of heat transfer and electromagnetism in the cable line in conditions of laying the cable with a coupling, in the ground. The numerical realization of the mathematical model was carried out Using the finite element method in one of the ANSYS software packages in the Free environment. Plus 1×400 for a constant voltage of 10 kV. As a result of the numerical solution, there were limited fields in the coupler connection of the power cable and the environment. As a result of analyzing the results of measurements of temperature fields, acceptable permissible current loads were available.

Keywords: joint, power cable, temperature field distribution.

Для прокладки кабелей на большие расстояния используют не одну, а несколько строительных длин, которые соединяются между собой кабельной муфтой. Нужно отметить, что многочисленные отказы при эксплуатации кабелей связаны с некачественным монтажом муфт, с повышенным электрическим сопротивлением в месте соединения жил. Известно, что допустимые максимальные токи определяются условиями работы, когда максимальная температура жилы не превысит допустимого значения [1–7].

Для постановки математической модели сделаны следующие допущения:

- теплофизические свойства материалов постоянны;
- исследуется только половина муфты;
- полупроводящие экраны из ПЭ совмещены с фазной изоляцией;
- болтовое соединение жил представлено цилиндром.

Математическая модель, описывающая процессы теплопереноса в кабельной линии и муфте, основанная на законе сохранения энергии, в дифференциальной постановке имеет следующий вид [8–12]:

$$\rho_j c_j \frac{\partial T}{\partial t} = -\lambda_j \Delta T + q_v, \quad (1)$$

где ρ_j , c_j , λ_j – плотность, теплоемкость, коэффициент теплопроводности жилы, изоляции и муфты, кг/м³, Дж/(кг·С), В/(м·С); T – температура, °С; q_{vi} – мощность внутренних источников тепла в токопроводящей жиле, металлических экранах и болтовом соединении, в уравнении для изоляции данная составляющая отсутствует, Вт/м³; t – время процесса, с.

Граничные условия по температуре:

– на твердых границах контакта разнородных сред: жила – изоляция; жила – муфта задаются условия 4-го рода и равенство температур:

• на поверхности изоляции и муфты задается граничное условие конвективного теплообмена. Задаются: α – коэффициент теплоотдачи

с поверхности муфты и изоляции в окружающую среду, $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{С})$, и $T_{\text{ср}}$ – температура окружающей среды, $T_{\text{ср}} = 18 \text{ }^\circ\text{С}$;

- на торцевой стороне кабеля задаются адиабатические условия по температуре.

Мощность внутреннего источника тепла в токопроводящей жиле и в металлическом экране определяется согласно закону Джоуля–Ленца по формуле:

$$q_{vi} = \iint_S \frac{I_i^2}{\sigma_i} dS, \quad (2)$$

где I_i – номинальный ток жилы, болтового соединения и металлических экранов силового кабеля и муфты, А; σ_i – коэффициент удельной электропроводности токопроводящей жилы, болтового соединения и металлического экрана муфты и силового кабеля.

Для определения дополнительных тепловых потерь в металлическом экране силового кабеля q_{v2} необходимо рассматривать задачу электро- и магнитодинамики, при постановке которой были сделаны следующие допущения: кабель бесконечно длинный; электродинамические характеристики используемых материалов постоянны и изотропны; фазные токи синусоидальны и сбалансированы; все величины поля изменяются синусоидально во времени; электромагнитное поле является квазистационарным; электропроводностью массива земли пренебрегаем; токи смещения не учитываются.

Математическая модель электродинамических процессов в кабельных линиях основывается на уравнениях Максвелла. Для векторного магнитного потенциала и плотности токи уравнения записываются в следующем виде [13–14]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_i} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_i} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) - j\omega\sigma_i A_z + J_i = 0, \quad (3)$$

$$-j\omega\sigma^i A_z + J^{is} = J^i, \quad (4)$$

$$\iint_{S^i} J^i = I_{hi}, \quad (5)$$

$$-j\omega\sigma^6 A_z + J^{6s} = J^6, \quad (6)$$

$$\iint_{S^6} J^6 dS = I^6, \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_5} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_5} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_i} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_i} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = 0, \quad (9)$$

где x, y – декартовы координаты; j – мнимая единица; ω – круговая частота, рад/с; A_z – компонента векторного магнитного потенциала, Вб/м; J^i – плотность тока в токопроводящей жиле, болтовом соединении и в экране силового кабеля соответственно, А/м²; μ_1, μ_6, μ_5 – магнитная проницаемость токопроводящей жилы, экрана силового кабеля, болтового соединения, Гн/м; $\sigma^1, \sigma^3, \sigma^5, \sigma^7$ – коэффициент удельной электропроводности токопроводящей жилы, болтового соединения, металлических экранов кабеля и муфты, См/м; I^i – ток в токопроводящей жиле кабеля, в металлическом экране соответственно, А; S^i – площадь поперечного сечения токопроводящей жилы, болтового соединения и экранов кабеля и муфты соответственно, м².

На внешних границах векторный магнитный потенциал равен нулю.

В исследуемой модели использовались геометрические размеры и характеристики материала силового кабеля марки ПвП-1×300 на напряжение 10 кВ и соединительной муфты ПСтО-10 (рис. 1) [15–17].

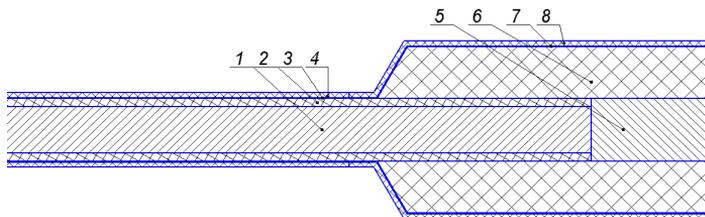


Рис. 1. Конструкция кабеля ПвП-1×300-10кВ и его радиальные размеры:

- 1 – токопроводящая жила; 2 – изоляция из сшитого полиэтилена;
- 3 – металлический экран; 4 – оболочка из полиэтилена; 5 – болтовое соединение;
- 6 – изоляция муфты; 7 – металлический экран муфты; 8 – оболочка муфты

Окружающая среда представляет собой прямоугольный массив грунта длиной 3 м, высотой 13 м и толщиной 20 м. Глубина прокладки кабеля равна 3 м (расстояние от оси кабеля до верхней стороны окружающей земли) [18–20].

Реализация разработанной математической модели осуществлялась методом конечных элементов в среде ANSYS с последовательным

решением задачи в программных пакетах Fluent и Maxwell. Дискретный аналог модели построен с помощью блочной структуры, которая в дальнейшем была разбита на сетку [21]. На рис. 2 представлено сеточное разбиение сечения муфты.

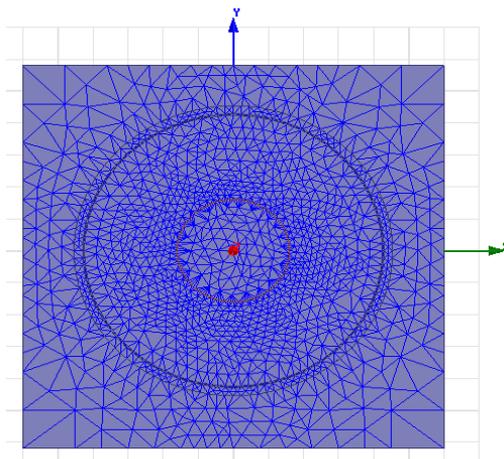


Рис. 2. Сеточная структура сечения муфты

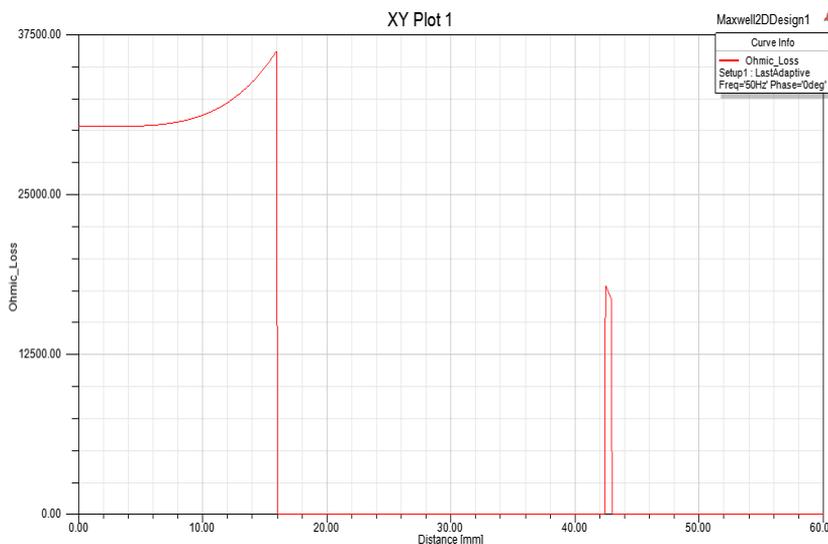


Рис. 3. Распределение потерь по радиусу муфты

Для получения результата было проведено исследование решения на сходимость, на основании которого определены необходимое количество элементов сетки и число итераций.

На первом этапе решалась задача электродинамики для определения потерь в металлических элементах модели.

Распределение потерь по радиусу муфты представлено на рис. 3, из которого видно, что потери не равномерно распределены как по болтовому соединению, так и по экрану. Искомое значение потерь определялось как среднее.

В результате решения электромагнитной задачи были получены значения потерь ($\text{Вт}/\text{м}^3$) для жилы, болтового соединения и экранов муфты и кабеля. Болтовой соединитель и часть жилы совмещены в единый цилиндр, проводимость которого выражена формулой (10). Параметр k является безразмерной величиной и определяется как отношение сопротивлений болтового соединения и токопроводящей жилы (ТПЖ). В соответствии с данным параметром определяется значение σ_2 из (10), которое отражает зависимость контактного сопротивления от температуры, данный метод описан в [22–23] и имеет экспериментальное подтверждение.

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_1}{k} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2, \quad (10)$$

где σ_2 – проводимость болтового соединения с учетом коэффициента k , который определяется как отношение сопротивлений болтового соединения к ТПЖ, σ_1 – проводимость ТПЖ, r_1 – радиус ТПЖ, r_2 – радиус болтового соединения [24–25],

$$k = \frac{R_2}{R_1}. \quad (11)$$

Параметр k зависит от температуры, данное распределение близко к линейному.

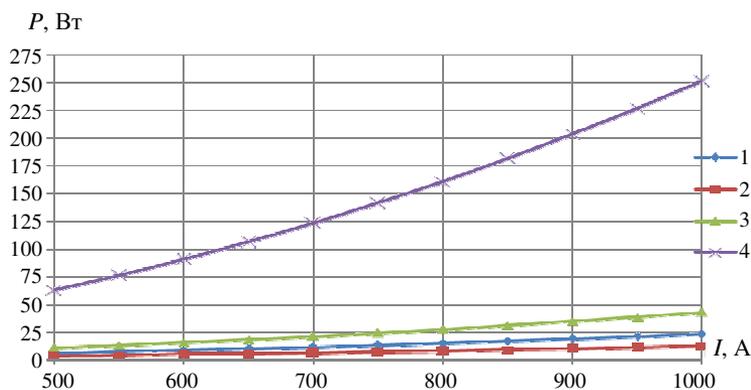


Рис. 4. Зависимость тепловых потерь в металлических элементах модели от тока линии: 1 – потери в жиле; 2 – в экране жилы; 3 – в экране муфты; 4 – в болтовом соединении

Зависимость потерь в металлических элементах от нагрузочного тока линии приведена на рис. 4, из которого видно, что с учетом ранее введенного коэффициента самые большие потери наблюдаются в болтовом соединении. Из графика распределения максимальной температуры изоляции кабеля и муфты в зависимости от длины модели, приведенного на рис. 5, видно, что температура в области муфты превышает допустимую на 12,8 °С.

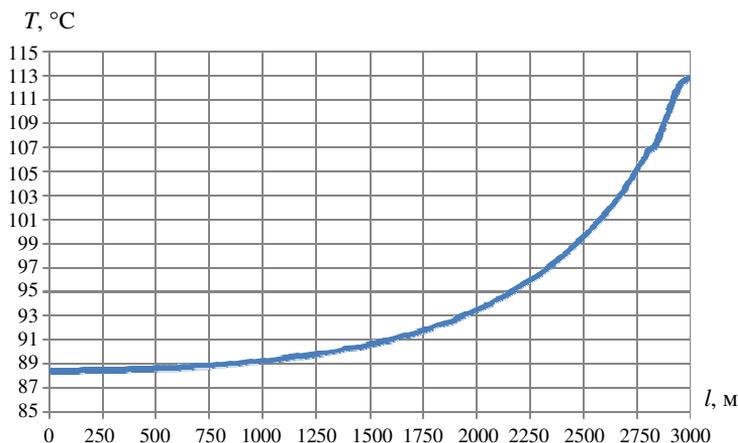


Рис. 5. Распределение максимальной температуры, реализуемой на изоляции кабеля и муфты

Выводы. Проведенные исследования показывают, что на перегрев в области муфты в значительной мере влияет контактное соединение болтового соединения. При увеличении токовой нагрузки возрастают потери в болтовом соединении. Перегрев наблюдается не только в области муфты, но и распространяется на прилегающие слои кабеля.

Библиографический список

1. Кабельный справочник [Электронный ресурс]. – URL: <https://k-ps.ru/spravochnik/kabeli-silovyye/s-izolyacziej-iz-sshitogo-polietilena-10kv/rvp-10kv> (дата обращения: 28.05.2017).
2. ГОСТ 55025-2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.
3. Все про полиэтилен [Электронный ресурс]. – URL: <https://propolyethylene.ru/shitiy/> (дата обращения: 28.05.2017).
4. Proelectro2 [Электронный ресурс]. – URL: http://www.proelectro2.ru/info/id_36 (дата обращения: 28.05.2017).

5. Ремонтно-механический завод [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mrmz.ru/electro/kabel/> (дата обращения: 28.05.2017).

6. МПК «Энергосфера» [Электронный ресурс]. – URL: <http://mpk-energospfera.ru/products/21/1295/> (дата обращения: 28.05.2017).

7. РуКадКам [Электронный ресурс]. – URL: http://rucadcam.ru/publ/cae_programmy/ansys/ansys/14-1-0-20 (дата обращения: 28.05.2017).

8. ANSYS [Электронный ресурс]. – URL: <http://cae-expert.ru> (дата обращения: 28.05.2017).

9. Лавров Ю.А. Кабели 6–35 кВ с пластмассовой изоляцией. Факторы эксплуатационной надежности [Электронный ресурс] // Новости электротехники. – 2006. – № 6(42). – URL: <http://www.news.elteh.ru/arch/2006/42/15.php> (дата обращения: 01.10.2014).

10. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов: справочник. – М.: Физматгиз. 1959. – 356 с.

11. Технические свойства полимерных материалов: учеб.-справ. пособие / В.К. Крыжановский [и др.]. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Профессия, 2005. – 248 с.

12. Расчет допустимых нагрузок одножильных кабелей с пластмассовой изоляцией / Э.Т. Ларина [и др.] // Электротехника. – 1991. – № 3. – С. 28–31.

13. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1984. – 632 с.

14. Бернхардт Э. Переработка термопластических материалов. – М.: Химия, 1965. – 747 с.

15. Силин В.А. Динамика процессов переработки пластмасс в червячных машинах. – М.: Машиностроение, 1972. – 150 с.

16. ГОСТ Р МЭК60287-1-1-2009. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Ч. 1–1. – М.: Стандартинформ, 2009. – 28 с.

17. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород: учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1984. – 359 с.

18. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации (утв. приказом Минэнерго РФ от 19 июня 2003 г. № 229) [Электронный ресурс]. – URL: http://base.garant.ru/186039/#block_58 (дата обращения: 05.07.2014).

19. 3D-анализ теплового и контактного сопротивления силового кабельного соединения / Фан Янг, Пенг Ченг, Ханву Ляо, Янгминг Янг, Хайбо Лиу, Кай Канг // Прикладная тепловая техника. – 2016. – Т. 93. – С. 1183–1192.

20. Вассерман А.А., Казавчинский Я.З., Рабинович В.А. Теплофизические свойства воздуха и его компонентов. – М.: Наука, 1966. – 375 с.

21. Вассерман А.А., Рабинович В.А. Теплофизические свойства жидкого воздуха и его компонентов. – М.: Изд-во стандартов, 1968. – 239 с.

22. Термодинамические свойства воздуха / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов, Г.А. Спиридонов, В.А. Цымарный. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 276 с.

23. Camerlingh Onnes H. Expression of the equation of state of gases and liquids by means of series // Comm. Leiden. – 1901. – № 71. – P. 1–25.

24. Боголюбов Н.Н. Проблемы динамической теории в статистической физике. – М.: Гостехиздат, 1946. – 118 с.

25. Баскаков А.П. Теплотехника. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 224 с.

References

1. Kabel'nyi spravochnik [Cable reference book], available at: <https://k-ps.ru/spravochnik/kabeli-silovye/s-izolyacziej-iz-sshitogo-polietilena-10kv/pvp-10kv> (accessed 28 May 2017).

2. GOST 55025-2012. Kabeli silovye s plastmassovoi izoliatsiei na nominalnoe napriazhenie ot 6 do 35 kV vkliuchitelno [GOST 55025-2012. Power cables with plastic isolation on rated voltage are from 6 to 35 kV inclusive]. Dostup iz spravochno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlus.

3. Vse pro polietilen [All about polyethylene], available at: <https://propolyethylene.ru/shitiy/> (accessed 28 May 2017).

4. Proelectro2, available at: http://www.proelectro2.ru/info/id_36 (accessed 28 May 2017).

5. Remontno-mekhanicheskii zavod [Mechanical-repair plant], available at: <https://www.mrmz.ru/electro/kabel/> (accessed 28 May 2017).

6. MPK “Energosfera” [MPK “Energosfera”], available at: <http://mpk-energosfera.ru/products/21/1295/> (accessed 28 May 2017).

7. RuKadKam, available at: http://rucadcam.ru/publ/cae_programmy/ansys/ansys/14-1-0-20 (accessed 28 May 2017).

8. ANSYS, available at: <http://cae-expert.ru> (accessed 28 May 2017).

9. Lavrov Iu.A. Kabeli 6–35 kV s plastmassovoi izoliatsiei. Faktory ekspluatatsionnoi nadezhnosti [Cables of 6-35 kV with plastic isolation. Factors

of operational reliability]. *Novosti elektrotehniki*, 2006, no. 6(42), available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2006/42/15.php> (accessed 01 October 2014).

10. Chirkin V.S. *Teplofizicheskie svoistva materialov: spravochnik* [Heatphysical properties of materials: reference book]. Moscow: Fizmatgiz. 1959. 356 p.

11. Kryzhanovskii V.K. [et al.]. *Tekhnicheskie svoistva polimernykh materialov* [Technical properties of polymeric materials]. 2nd ed. Saint Petersburg: Professia, 2005. 248 p.

12. Larina E.T. [et al.]. *Raschet dopustimykh nagruzok odnozhilnykh kabelei s plastmassovoi izoliatsiei* [Calculation of a permissible load of single-conductor cables with plastic isolation]. *Elektrotehnika*, 1991, no. 3, pp. 28-31.

13. Tadmor Z., Gogos K. *Teoreticheskie osnovy pererabotki polimerov* [Theoretical bases of processing of polymers]. Moscow: Khimiia, 1984. 632 p.

14. Bernkhardt E. *Pererabotka termoplasticheskikh materialov* [Processing of thermoplastic materials]. Moscow: Khimiia, 1965. 747 p.

15. Silin V.A. *Dinamika protsessov pererabotki plastmass v cherviachnykh mashinakh* [Dynamics of processes of processing of plastic in worm cars]. Moscow: Mashinostroenie, 1972. 150 p.

16. GOST R MEK60287-1-1-2009. *Kabeli elektricheskie. Raschet nominalnoi tokovoi nagruzki. Chast 1-1* [GOST P MEK60287-1-1-2009. Electric cables. Calculation of rated current load. Part 1-1]. Moscow: Standartinform, 2009. 28 p.

17. Rzhetskii V.V., Novik G.Ia. *Osnovy fiziki gornykh porod* [Fundamentals of physics of rocks]. 4nd ed. Moscow: Nedra, 1984. 359 p.

18. *Pravila tekhnicheskoi ekspluatatsii elektricheskikh stantsii i setei Rossiiskoi Federatsii (utv. prikazom Minenergo RF ot 19 June 2003 g. № 229)* [The rules of technical operation of power plants and networks of the Russian Federation (approved by the order of the Ministry of Energy of the Russian Federation of June 19, 2003 № 229)], available at: http://base.garant.ru/186039/#block_58 (accessed 05 July 2014).

19. Phan Yang, Peng Cheng, Hanwu Liao, Yangming Yang, Haibo Liu, Kai Kang. *3D-analiz teplovogo i kontaktnogo soprotivleniia silovogo kabel'nogo soedineniia* [3D analysis of thermal and contact resistance of a power cable connection]. *Prikladnaia teplovaia tekhnika*, 2016, vol. 93, pp. 1183-1192.

20. Vasserman A.A., Kazavchinskii Ia.Z., Rabinovich V.A. *Теплофизические свойства воздуха и его компонентов* [Heatphysical properties of air and its components]. Moscow: Nauka, 1966. 375 p.

21. Vasserman A.A., Rabinovich V.A. *Теплофизические свойства жидкого воздуха и его компонентов* [Heatphysical properties of liquid air and its components]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1968. 239 p.

22. Sychev V.V., Vasserman A.A., Kozlov A.D., Spiridonov G.A., Tsymarnyi V.A. *Термодинамические свойства воздуха* [Thermodynamic properties of air]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1978. 276 p.

23. Camerlingh Onnes H. Expression of the equation of state of gases and liquids by means of series. *Comm. Leiden*, 1901, no. 71, pp. 1-25.

24. Bogoliubov N.N. *Проблемы динамической теории в статистической физике* [Problems of the dynamic theory in statistical physics]. Moscow: Gostekhizdat, 1946. 118 p.

25. Baskakov A.P. *Теплотехника* [Heat engineering]. Moscow: Jenergoatomizdat, 1991. 224 p.

Сведения об авторах

Зыков Антон Сергеевич (Пермь, Россия) – магистрант Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: toni.zykov.95@mail.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-т, 29, e-mail: ktei@pstu.ru).

About the authors

Zykov Anton Sergeevich (Perm, Russian Federation) is a Master Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: toni.zykov.95@mail.ru).

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

Получено 08.10.2018