

УДК 621.315

А.С. Зыков, Н.М. ТруфановаПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ МУФТЫ
СИЛОВОГО КАБЕЛЯ НА НАПРЯЖЕНИЕ 10 кВ**

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. Поскольку муфта имеет большее тепловое сопротивление, чем у кабеля, то распределение температурных полей в ней будет отличным. В данной статье с учетом сделанных допущений и граничных условий разработана трехмерная математическая модель процессов теплопереноса в кабельной линии в условиях проложения кабеля с соединительной муфтой, в земле или в воздушной среде. 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 поля температур и скоростей в муфтовом соединении, силовом кабеле и окружающей среде. В результате анализа полученных результатов распределения температурных полей были определены оптимально допустимые токовые нагрузки. Выполнено сравнение пропускной способности кабельной линии с муфтовым соединением в условиях воздушного искусственного охлаждения и в случаях, когда окружающая среда – грунт.

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

A.S. Zykov, N.M. Trufanova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**NUMERICAL ANALYSIS OF THE TEMPERATURE FIELDS
OF THE CLUTCH OF A POWER CABLE
WITH A VOLTAGE OF 10 kV**

Laying of power cables with insulation from cross-linked polyethylene for 10 kV is carried out in the ground or cable channels, during the laying, there is a need to connect the two building lengths of cables. The connection is made by means of a coupling. The design of the coupling is similar to the cable design, but radially large, for the following reasons: bolted connection of cores and large insulation thickness. When the rated current flows through the core, heat is generated, according to the Joule-Lenz law. Since the coupling has a greater thermal resistance than the cable, the distribution of the temperature fields in it

will be excellent. In this article, taking into account the assumptions made and the boundary conditions, a three-dimensional mathematical model of heat transfer processes in the cable line has been developed, taking into account the couplings laid in the ground and located in the air. Numerical realization of the supplied mathematical model was carried out using the finite element method in one of the Ansys software packages in the Fluent environment. The analysis of the operation of the cable line and a cable joint of PVP 1×400 type to a constant voltage of 10 kV is made. As a result of the numerical solution, the temperature and velocity fields in the coupler, power cable and the environment were determined. As a result of the analysis of the obtained results of the distribution of temperature fields, the optimum permissible current loads were determined. The comparison of the cable line capacity with the coupling in the conditions of air cooling and the cases when the environment is ground.

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, 2].

Математическая модель, описывающая процессы теплопереноса в кабельной линии и муфте, основанная на законе сохранения энергии, в дифференциальной постановке имеет следующий вид [3–5, 6,7]:

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

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_v – мощность внутренних источников тепла в токопроводящей жиле, в уравнении для изоляции данная составляющая отсутствует Вт/м³; t – время процесса, с.

При этом сделано следующее допущение:

- теплофизические свойства материалов постоянны;
- исследуется только половина муфты;
- потери в металлическом экране не учитываются.

Граничные условия задаем на поверхностях геометрии:

– 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, $T_{\text{ср}} = 18 \text{ °С}$;

• на торцевой стороне кабеля задаются адиабатические условия по температуре.

В исследуемой модели использовались геометрические размеры и характеристики материала силового кабеля марки ПвП-1×300 на напряжение 10 кВ (рис. 1) и соединительной муфты 1ПСтО-10 (рис. 2) [8–10, 11]. Теплофизические характеристики материалов приведены в табл. 1.

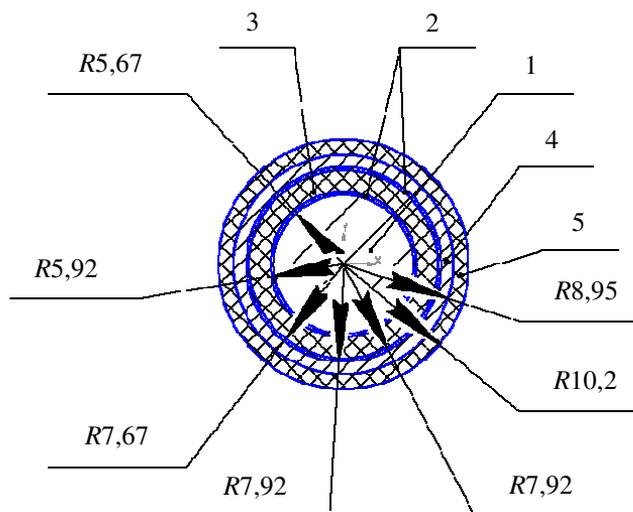


Рис. 1. Конструкция кабеля ПвП-1х300-10кВ и его радиальные размеры: 1 – токопроводящая жила; 2 – экраны из полупроводящего полиэтилена; 3 – изоляция из сшитого полиэтилена; 4 – экран из медных проволок; 5 – оболочка из полиэтилена

Конструктивно муфта содержит те же элементы, что и присоединяемый к ней кабель. Теплофизические характеристики материалов, используемых в модели, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Теплофизические характеристики материалов

Элемент	Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Теплопроводность λ , Вт/м·К	Теплоемкость C , Дж/кг·К
Конструкция кабеля				
Жила, экран	Медь	8978	387,6	381
Изоляция, оболочка	Полиэтилен	950	2100	0,34
Окружающая среда				
Массив земли	Обчный грунт	2000	0,5	2100
Массив земли	Засыпной грунт	2000	2500	0,833

Окружающая среда представляет собой прямоугольный массив с длиной 1500 м, высотой 23 м и толщиной 40 м. Глубина прокладки кабеля равна 3 м (расстояние от оси кабеля до верхней стороны окружающей земли) [12–15].

Реализация разработанной математической модели осуществлялась методом конечных элементов в среде ANSYS. Дискретный аналог модели выстроен с помощью блочной структуры, которая в дальнейшем была разбита на сетку [16–19]. Последовательность действий приведена на рис. 2 и 3.

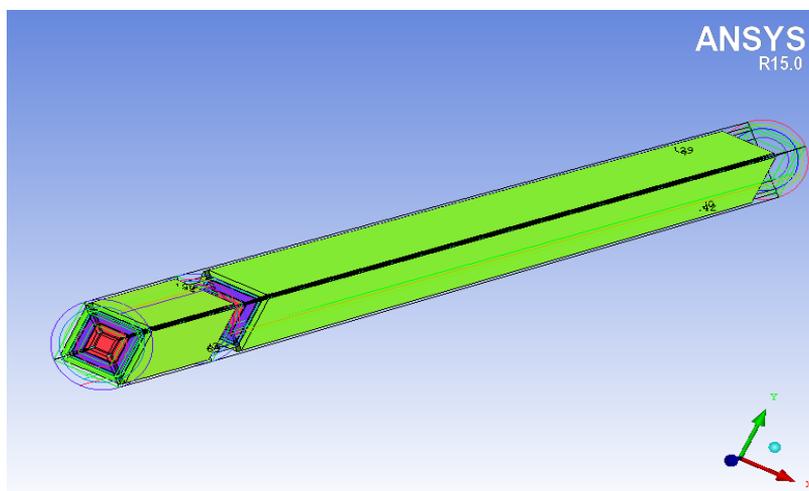


Рис. 2. Блочная структура

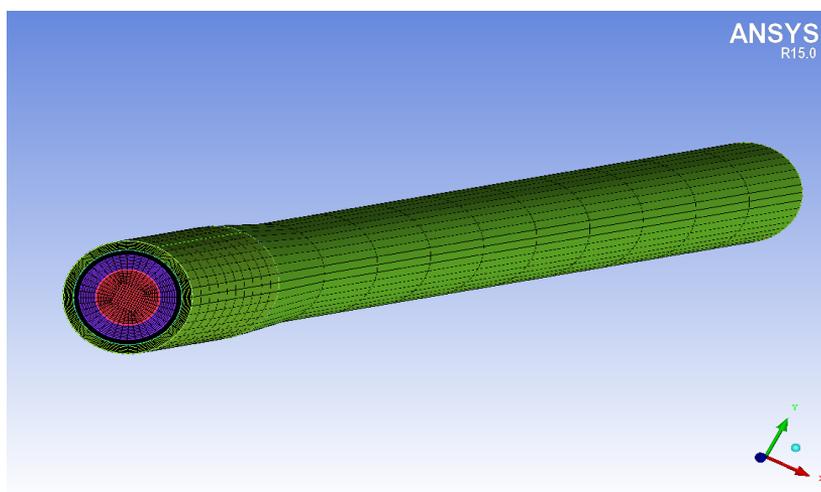


Рис. 3. Сетка, построенная на блочной структуре

В результате численной реализации предложенной математической модели были получены поля температур в кабельной линии и муфте при различных условиях прокладки [20].

На рис. 4–6 представлено распределение температуры в кабельной муфте и массиве земли. Из рисунков видно, что температура в области муфты превышает допустимую на 1 град.

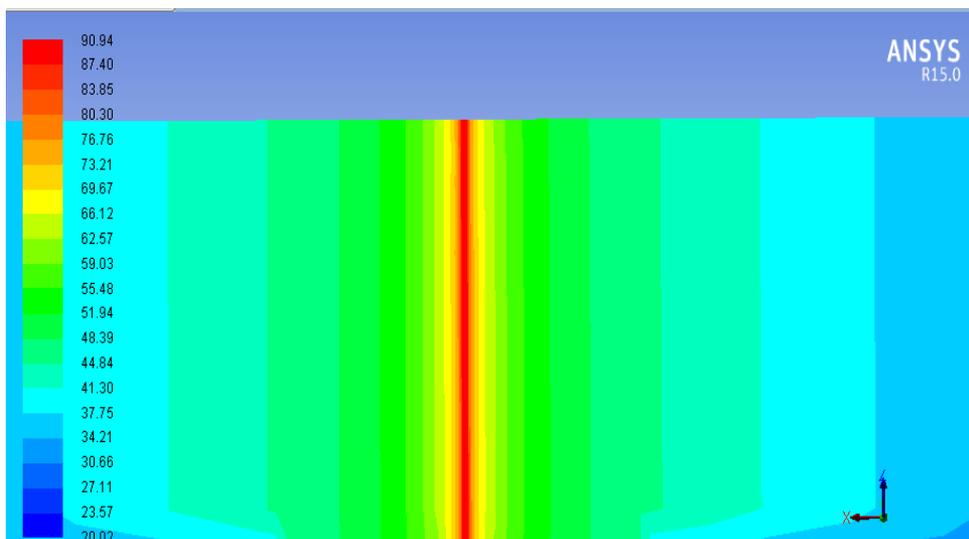


Рис. 4. Распределение температурного поля вдоль кабеля, муфты и земляного массива

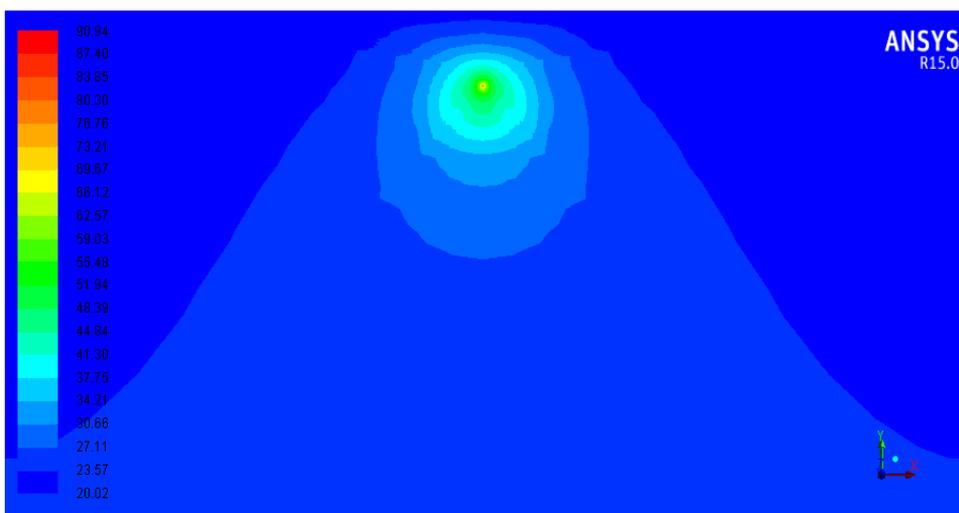


Рис. 5. Распределение температуры в поперечном сечении муфты и земляного массива

Превышение температуры составляет 1 град, допустимый ток кабеля при этом 774 А, при снижении тока до 770 А температура не превышает допустимую.

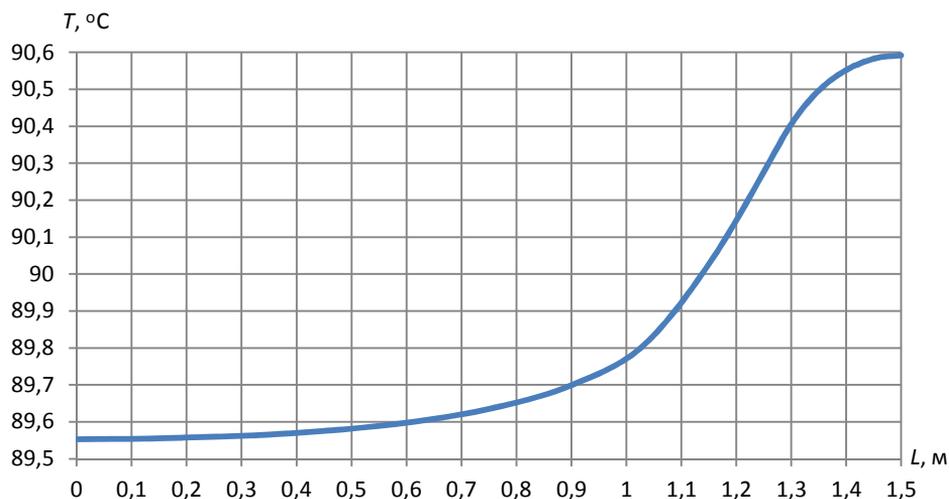


Рис. 6. Значения температуры внутренней поверхности изоляции в зависимости от длины исследуемой модели при прокладке в земле

В табл. 2 представлены результаты допустимых и сниженных токов в зависимости от окружающей среды.

Таблица 2

Результаты допустимых и сниженных токов в зависимости от окружающей среды

Температура, °C	I1, А	I2, А	% _{сн}
-20	940	935	0,5
-10	902	897,5	0,5
0	861	857	0,5
10	818	814	0,5
20	774	770	0,5

Замечание: здесь I1 – допустимый ток, А; I2 – ток, сниженный из-за перегрева кабеля в области соединения муфты; %_{сн} – процент снижения тока с I1 до I2.

При монтаже кабельной соединительной муфты в специальных кабельных колодцах учитывается движение воздуха при скорости 0,9 м/с.

На рис. 7–9 представлено распределение полей температур и скоростей при использовании воздуха в качестве окружающей среды [21–24].

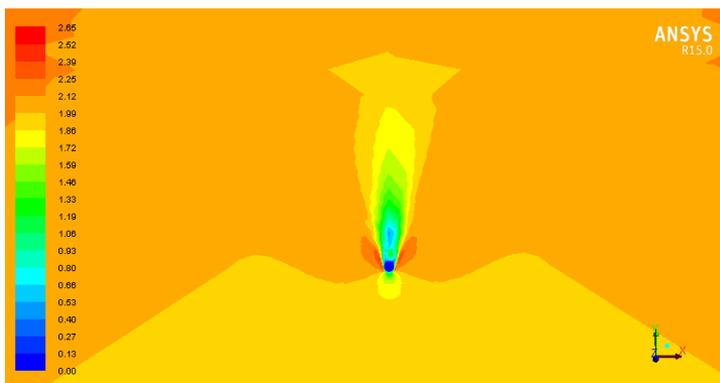


Рис. 7. Распределение скоростей потоков воздуха

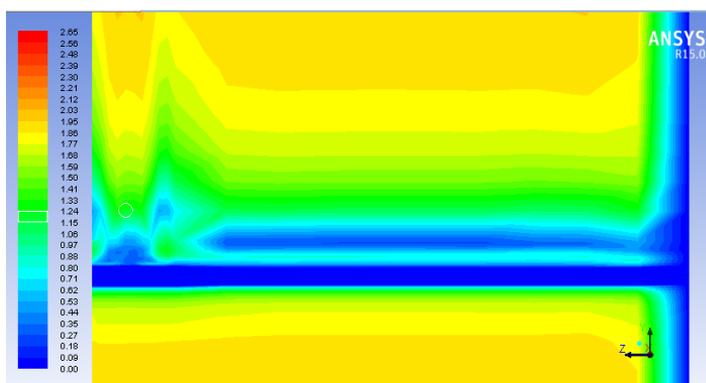


Рис. 8. Распределение скоростей в продольном сечении кабеля и соединительной муфты

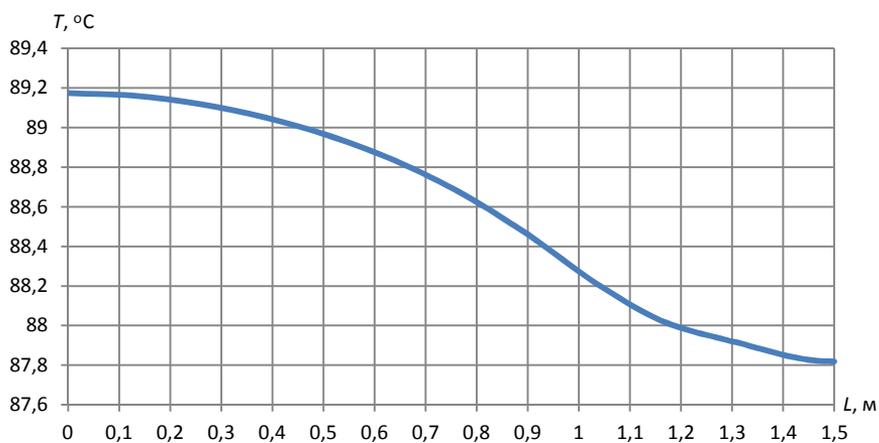


Рис. 9. Значения температуры внутренней поверхности изоляции в зависимости от длины исследуемой модели при нахождении муфты в кабельном колодце

Из рис. 7–9 следует, что поверхность муфты охлаждается быстрее поверхности кабеля. Величина допустимого тока, проходящего через кабель, составляет 940 А, при этом необходимости снижать его нет. В сравнении с результатами исследований охлаждения муфты кабеля в массиве земли данное значение тока ниже, это связано с низкой скоростью движения воздуха.

Выводы. Превышение температуры в области муфты вызвано большим тепловым сопротивлением конструкции муфты в сравнении с термическим сопротивлением кабеля. При прокладке кабеля с соединительной муфтой необходимо учитывать этот факт и рассчитывать допустимые токи и передаваемую мощность.

Библиографический список

1. Боголюбов Н.Н. Проблемы динамической теории в статистической физике. – М.: Гостехиздат, 1946. – 118 с.
2. Баскаков А.П. Теплотехника. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 224 с.
3. Proelectro2 [Электронный ресурс]. – URL: http://www.proelectro2.ru/info/id_36 (дата обращения: 28.05.2017).
4. Ремонтно-механический завод [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.mrmz.ru/electro/kabel/> (дата обращения: 28.05.2017).
5. МПК Энергосфера [Электронный ресурс]. – URL: <http://mpk-energospfera.ru/products/21/1295/> (дата обращения: 28.05.2017).
6. Гадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1984. – 632 с.
7. Бернхардт Э. Переработка термопластических материалов. – М.: Химия, 1965. – 747 с.
8. Кабельный справочник [Электронный ресурс]. – URL: <https://k-ps.ru/spravochnik/kabeli-silovyie/s-izolyacziej-iz-sshitogo-polietilena-10kv/rvp-10kv> (дата обращения: 28.05.2017).
9. ГОСТ 55025-2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.
10. Все про полиэтилен [Электронный ресурс]. – URL: <https://propolyethylene.ru/shitiy/> (дата обращения: 28.05.2017).

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

12. 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/arh/2006/42/15.php> (дата обращения: 01.10.2014).

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

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

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

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

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

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

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

20. 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).

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

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

23. 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.

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

References

1. Bogoliubov N.N. Problemy dinamicheskoi teorii v statisticheskoi fizike [Problems of the dynamic theory in statistical physics]. Moscow: Gostekhizdat, 1946. 118 p.
2. Baskakov A.P. Teplotekhnika [Heat engineering]. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 224 p.
3. Proelectro2, available at: http://www.proelectro2.ru/info/id_36 (accessed 28 May 2017).
4. Remontno-mekhanicheskii zavod [Mechanical-repair plant], available at: <https://www.mrmz.ru/electro/kabel/> (accessed 28 May 2017).
5. MPK Energosfera [MPK Energosfera], available at: <http://mpk-energospfera.ru/products/21/1295/> (accessed 28 May 2017).
6. Tadmor Z., Gogos K. Teoreticheskie osnovy pererabotki polimerov [Theoretical bases of processing of polymers]. Moscow: Khimiia, 1984. 632 p.
7. Bernkhardt E. Pererabotka termoplasticheskikh materialov [Processing of thermoplastic materials]. Moscow: Khimiia, 1965. 747 p.
8. Kabel'nyi spravochnik [Cable reference book], available at: <https://k-ps.ru/spravochnik/kabeli-silovyie/s-izolyacziej-iz-sshitogo-polietilena-10kv/vvp-10kv> (accessed 28 May 2017).
9. GOST 55025-2012. Kabeli silovye s plastmassovoi izoliatsiei na nominal'noe napriazhenie ot 6 do 35 kV vkliuchitel'no [GOST 55025-2012. Power cables with plastic isolation on rated voltage are from 6 to 35 kV inclusive]. Dostup iz spravochno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.
10. Vse pro polietilen [All about polyethylene], available at: <https://propolyethylene.ru/shitiy/> (accessed 28 May 2017).
11. RuKadKam [RuKadKam], available at: http://rucadcam.ru/publ/cae_programmy/ansys/ansys/14-1-0-20 (accessed 28 May 2017).
12. 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 elektrotekhniki*, 2006, no. 6(42), available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2006/42/15.php> (accessed 01 October 2014).
13. Chirkin V.S. Teplofizicheskie svoistva materialov: spravochnik [Heatphysical properties of materials: reference book]. Moscow: Fizmatgiz. 1959. 356 p.

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

15. Larina E.T. [et al]. *Raschet dopustimykh nagruzok odnozhil'nykh kabelei s plastmassovoi izoliatsiei* [Calculation of a permissible load of single-conductor cables with plastic isolation]. *Elektrotehnika*, 1991, no. 3, pp. 28-31.

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

17. 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.

18. GOST R MEK60287-1-1-2009. *Kabeli elektricheskie. Raschet nominal'noi 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.

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

20. *Pravila tekhnicheskoi ekspluatatsii elektricheskikh stantsii i setei Rossiiskoi Federatsii (utverzhdennye prikazom Minenergo RF ot 19 iyunia 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).

21. Vasserman A.A., Kazavchinskii Ia.Z., Rabinovich V.A. *Teplofizicheskie svoistva vozdukha i ego komponentov* [Heatphysical properties of air and its components]. Moscow: Nauka, 1966. 375 p.

22. Vasserman A.A., Rabinovich V.A. *Teplofizicheskie svoistva zhidkogo vozdukha i ego komponentov* [Heatphysical properties of liquid air and its components]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1968. 239 p.

23. Sychev V.V., Vasserman A.A., Kozlov A.D., Spiridonov G.A., Tsymarnyi V.A. *Termodinamicheskie svoistva vozdukha* [Thermodynamic properties of air]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1978. 276 p.

24. 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.

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, head of the Department of designing and technology in electrical equipment Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: ktei@pstu.ru).

Получено 09.10.2017