

УДК 621.315

**Н.В. Истомин, Н.М. Труфанова**Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия**АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ,  
ПРОЛОЖЕННОЙ ПО МОСТУ, И ВЫБОР ЕЕ РАЦИОНАЛЬНОГО  
РАСПОЛОЖЕНИЯ**

Для силовых кабелей главным воздействующим фактором в процессе эксплуатации, определяющим их работоспособность, является тепловой режим, на который оказывают влияние следующие факторы: геометрические параметры кабельного канала и конструктивных элементов кабельных линий, способ прокладки кабельных линий, теплофизические характеристики используемых материалов, условия сложного теплообмена, влияние индуцированных токов, возникающих в металлических элементах конструкции силового кабеля и многих других.

Таким образом, проектирование кабельных каналов и обеспечение работоспособности кабельных линий в условиях сложного теплообмена с окружающей средой невозможно без глубокого понимания процессов теплопереноса в кабельном канале с учетом реализующегося в кабельных линиях переменного электромагнитного поля и индуцированных токов в металлических экранах.

Одним из основных инструментов, способствующих получению заданного результата и позволяющих свести к минимуму дорогостоящие натурные испытания, являются методы математического моделирования и численного эксперимента.

В статье рассмотрены двумерные математические модели процессов теплопереноса для различных способов прокладки кабельных линий в подвесном железнодорожном мосту. Реализация которых осуществлялась численным методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS, ANSYS Fluent. В результате совместного решения задач сложного теплопереноса и электродинамики получены распределения полей скоростей и температур для различных вариантов прокладки кабельных линий на мосту. Определено влияние расположения кабельной линии на величину максимальной температуры в изоляции, определена её связь с интенсивностью конвективного теплообмена. Найдены значения допустимых токов во всех способах прокладки, при этом температура на поверхности изоляции во всех случаях не превышала максимально допустимую. В результате анализа было выявлено, что значительное воздействие на предельную токовую нагрузку оказывает способ прокладки кабельных линий. Обоснован наиболее рациональный способ прокладки кабельных линий в подвесном мосту.

**Ключевые слова:** математическая модель, кабельная линия, температурное поле, токовая нагрузка.

**N.V. Istomin, N.M. Trufanova**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **ANALYSIS OF THE TEMPERATURE FIELD OF THE CABLE LINE LAID ON THE BRIDGE AND THE CHOICE OF ITS RATIONAL ARRANGEMENT**

For power cables the main influencing factor in the process of operation, determining their efficiency is the thermal conditions, influenced by the following factors: geometrical parameters of conduit and structural elements of cable lines, the method of laying of cables, thermal characteristics of the materials used, the conditions of complex heat transfer, the effect of induced electric currents arising in metallic elements of design power cable, and many others.

Thus, the design of cable channels and ensuring the efficiency of cable lines in the complex conditions of heat exchange with the environment is impossible without a thorough understanding of the processes of heat and mass transfer in conduit taking into account realized in the cable lines of alternating electromagnetic fields and induced currents in the metallic screens.

One of the main instruments for obtaining a given output and allowing you to minimize costly field tests are the methods of mathematical modeling and numerical experiment.

The article considers a two-dimensional mathematical model of heat and mass transfer processes for different methods of laying cable lines suspended railway bridge. The implementation of which was carried out numerically by the finite element method using ANSYS software, ANSYS Fluent. As a result of joint solution of tasks of complex heat transfer and electrostatics of the distributions fields of the velocity and temperature for different variants of laying cable lines on the bridge. The influence of the location of the cable line on the maximum temperature in isolation, and defined by its relationship with the intensity of convective heat transfer. The values of permissible currents in all methods of laying, the surface temperature of the insulation in all cases did not exceed the maximum allowable. The analysis revealed that a significant effect on the maximum load current provides a method of laying cable lines. Justified by the most rational method of laying cables in a suspension bridge.

**Keywords:** mathematical model, cable line, temperature field, current load.

В настоящее время существует высокая потребность использования кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена при передаче энергии среднего и высокого напряжения. Прокладка кабельных линий реализуется множеством способов – от обустройства подземных каналов до фиксации контура в специальных сооружениях. Каждый вариант монтажа предполагает соблюдение особых норм и технических условий в зависимости от условий прокладки [1–3]. Вопросам математического моделирования процессов теплообмена в кабельных линиях посвящено большое количество работ.

Процессам теплопереноса в режиме перегрузки кабельных линий и ограниченного теплообмена посвящены работы [4, 5]. В работах [6–9] рассматривались задачи процессов теплопереноса в кабельном канале, проложенном в земле, в условиях естественной

конвекции и с учетом лучистой энергии и с определением допустимых токовых нагрузок. В [10] моделировались нестационарные тепловые процессы в одножильном силовом кабеле с изоляцией из сшитого полиэтилена, проложенном в воздухе. Двумерная стационарная математическая модель процессов тепломассопереноса при открытой и закрытой прокладке в кабельных лотках рассмотрена в работе [11]. Роберто де Лието Волларо с соавторами в работах [12, 13] решали двумерную стационарную задачу теплопроводности в одножильном силовом кабеле с постоянными теплофизическими характеристиками, проложенном в земле.

В данной работе рассматриваются возможные варианты прокладки кабелей в мостовой конструкции. Поскольку срок службы кабельных линий определяется температурным режимом при эксплуатации [14], то необходим анализ температурных полей в кабельных линиях при различных прокладках по мосту. Для выбора наиболее рациональной прокладки кабельных линий была разработана двумерная стационарная математическая модель процессов тепломассопереноса в кабельной линии, проложенной в мостовой конструкции с учетом конвективного теплообмена.

При создании модели были сделаны допущения: модель двумерная; процесс стационарный; режим движения воздуха ламинарный; солнечная радиация не учитывается; воздушная среда считается прозрачной, а твердые поверхности, участвующие в теплообмене, – серыми поверхностями; на границах раздела разнородных сред реализуется условие идеального теплового контакта; теплофизические свойства материалов постоянны.

Процесс тепломассопереноса описывается дифференциальными уравнениями:

– уравнение движения воздуха:

$$U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial U_x}{\partial y}, \quad (1)$$

$$U_x \frac{\partial U_z}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_z}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial U_z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial U_z}{\partial y}; \quad (2)$$

– уравнение неразрывности:

$$U_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + U_y \frac{\partial \rho}{\partial y} = \rho \left( \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} \right); \quad (3)$$

– уравнение энергии для воздуха:

$$\rho_{\text{в}} c_{\text{в}} \left( U_x \frac{\partial t}{\partial x} + U_y \frac{\partial t}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \lambda_{\text{в}} \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda_{\text{в}} \frac{\partial t}{\partial y}; \quad (4)$$

– уравнение теплопроводности для кабельных линий:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_u \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_u \frac{\partial t}{\partial y} \right) + q_{\text{в1}} = 0; \quad (5)$$

– уравнение теплопроводности для твердых материалов:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_i \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_i \frac{\partial t}{\partial y} \right) = 0. \quad (6)$$

Плотность воздуха зависит от температуры по закону Буссинеска:

$$\rho_{\text{в}}(T) = \rho_0 [1 - \beta(t - t_0)], \quad (7)$$

где  $x, y$  – декартовы координаты;  $U_x, U_y$  – компоненты вектора скорости воздуха;  $t$  – температура, °С;  $P$  – отклонения давления воздуха от гироскопического;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho_{\text{в}}, \mu_{\text{в}}, c_{\text{в}}$  – плотность, вязкость и теплоемкость воздуха;  $\rho_0$  – плотность воздуха при температуре  $t_0 = 20$  °С,  $q_{\text{в1}}$  – мощность внутреннего источника тепла;  $\beta$  – температурный коэффициент плотности воздуха;  $\lambda_{\text{в}}, \lambda_u, \lambda_i$  – теплопроводность воздуха, изоляции и твердых материалов прокладки соответственно.

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

$$q_{\text{в1}} = \iint_S \frac{I_1^2}{\sigma_5^1} dS, \quad (8)$$

где  $I_1$  – номинальный ток жилы силового кабеля, А;  $\sigma_5^1$  – коэффициент удельной электропроводности токопроводящей жилы, См/м.

Система уравнений (1)–(8) замыкается следующими граничными условиями: для скоростей на поверхности стенки канала и кабелей – условия непроникновения и прилипания; на границах контакта разнородных сред задавались граничные условия четвертого рода и условия сопряжения температур; на границах расчетной области задавались условия установившегося теплообмена.

Поскольку размеры окружающей среды намного больше кабельных линий, то для упрощения геометрии размерами полупроводящих экранов пренебрегаем ввиду их малых номинальных размеров, не оказывающих значительного влияния на распределение энергии в кабеле. Конструкция кабеля состоит из алюминиевой токопроводящей изоляции из сшитого полиэтилена, экрана из медных проволок и оболочки из ПВХ пластиката. Наружный диаметр кабеля составляет 54 мм, диаметр токопроводящей жилы – 20 мм. Расстояние между кабелями 60 мм. Все необходимые теплофизические свойства материалов были взяты из справочника [15]. Геометрические размеры исследуемой области и возможные варианты расположения каленых линий представлены на рис.1. Вокруг кабельных линий циркулирует воздух, скорость потока 2 м/с. Температура окружающей среды 20 °С.

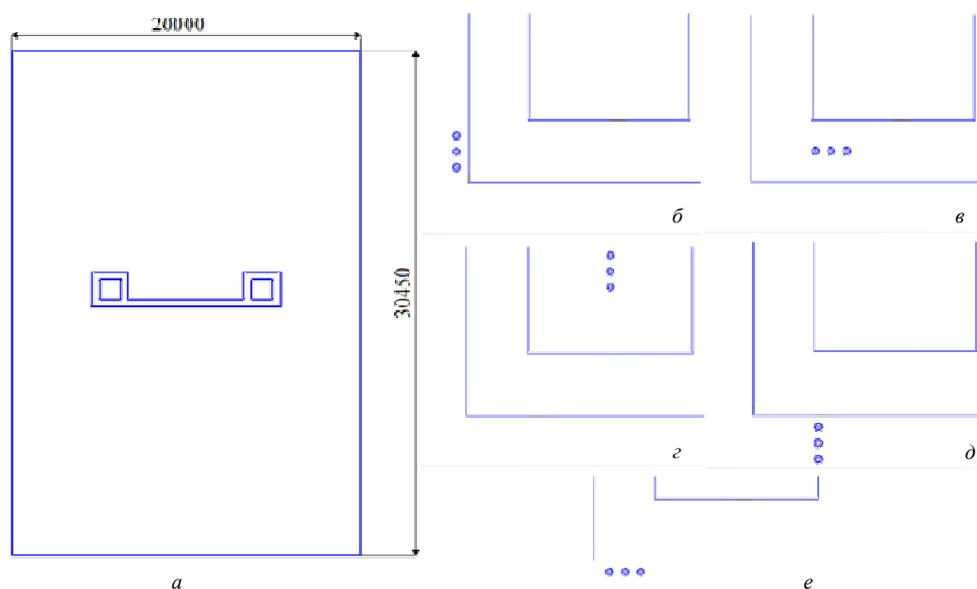


Рис. 1. Расчетная область: *a* – геометрические размеры (единицы измерения: мм); *б* – расположение кабельных линий с торцов балки; *в* – внутри бетонной конструкции; *г* – в воздушных секциях; *д* – кабельные линии под балочной конструкцией (вертикальное расположение); *е* – кабельные линии под балочной конструкцией (горизонтальное расположение)

Кабельная линия состоит из 3 кабелей. Рассмотрена конструкция кабеля, состоящая из жилы, изоляции из СПЭ, проволочного экрана и оболочки. Наружный диаметр кабеля составляет 54 мм, диаметр токопроводящей жилы 20 мм. Расстояние между кабелями 60 мм. Про-

кладка кабельных линий осуществлялась на однопролетном, железнодорожном вантовом мосту (см. рис. 2) [16]. Поставленная задача решена с помощью метода конечных элементов в программном комплексе ANSYS Fluent.

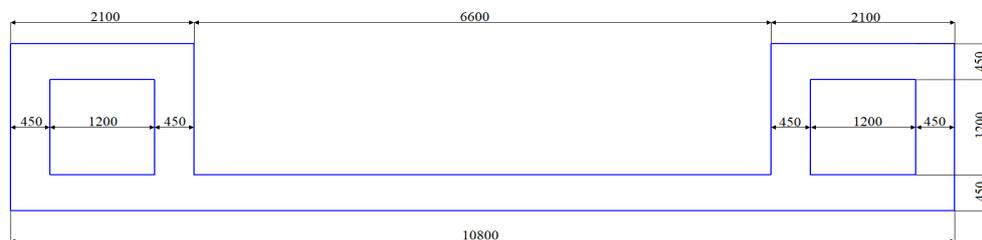


Рис. 2. Поперечное сечение моста (единицы измерения – мм)

**Расположение кабельных линий с торцов балки.** На рис. 3, *a–в* приведены поля температур и скоростей для первого варианта прокладки кабельной линии по мосту, когда последние расположены с торцов мостовой балки. Из рисунка видно, что для левого торца, где реализуются наиболее высокие значения скоростей, т.е. происходит наиболее активный конвективный теплообмен, значения температуры в изоляции наименьшие. Если температура на жиле для левого торца не превышает 50 °С, то на правом торце – 90 °С. Разница по температуре центральных кабелей составляет порядка 40 °С. Допустимая токовая нагрузка равна 439 А.

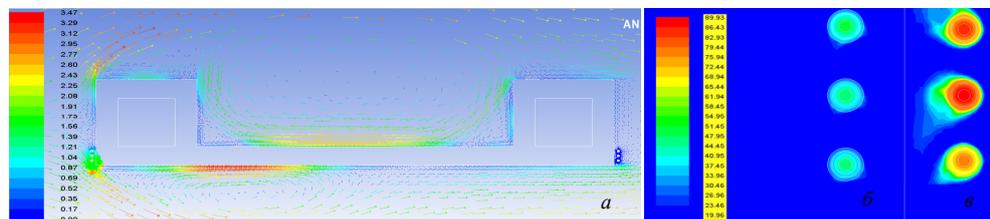


Рис. 3. Прокладка с торцов балки: *a* – поле распределения скоростей; *б* – температурное поле левой части; *в* – температурное поле в правой части балки

**Расположение кабельных линий внутри бетонной конструкции.** Очевидно, что влияние конвективного теплообмена для этого варианта прокладки кабельных линий (рис. 4, *a–в*) мало, и, как следствие, температура и для правой, и для левой кабельной линии практически одинакова. Значение максимальной температуры при равномерной загрузке всех линий на поверхности жил средних кабельных линий

равна допустимой 90 °С. Надлежит заметить, что бетонная конструкция вокруг кабелей интенсивно прогревается до температур 40–60 °С. При этом величина допустимой токовой нагрузки мало зависит от условий конвективного теплообмена – не более 2 %. Допустимая токовая нагрузка равна 411 А.

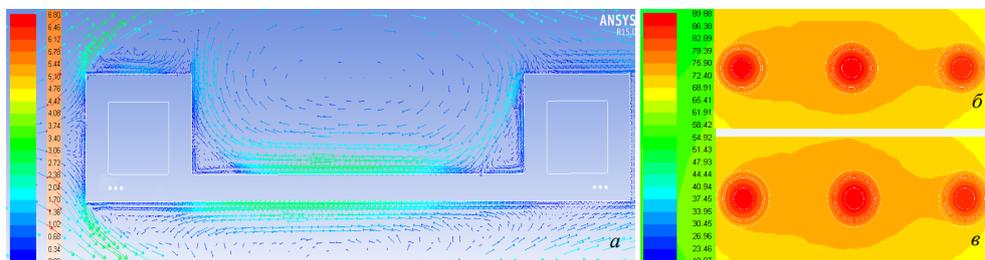


Рис. 4. Прокладка кабельных линий внутри бетонной конструкции:  
*а* – поле распределения скоростей; *б* – температурное поле левой части;  
*в* – температурное поле в правой части балки

**Расположение кабельных линий в воздушных секциях.** При расположении кабельных линий внутри воздушных секций взаимодействия воздушного потока с кабельными линиями нет (рис. 5, *а–в*). Из-за воздействия кабельных линий друг на друга наибольшему температурному влиянию подвергаются центральные кабели. Допустимая токовая нагрузка равна 92 А.

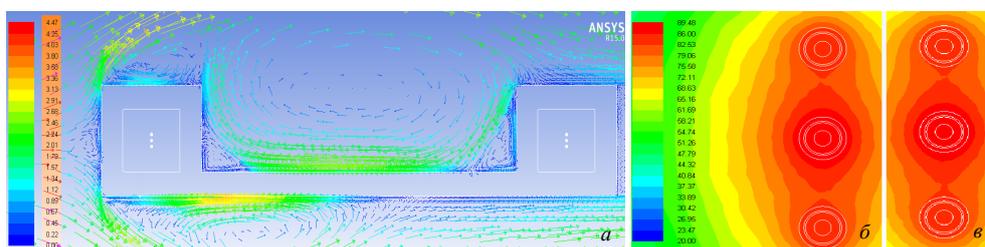


Рис. 5. Прокладка кабельных линий внутри воздушных секций:  
*а* – поле распределения скоростей; *б* – температурное поле  
 левой части; *в* – температурное поле в правой части балки

**Кабельные линии под балочной конструкцией (вертикальное расположение).** При вертикальном расположении кабельных линий под бетонной конструкцией моста (рис. 6, *а–в*) происходит интенсивный теплообмен с окружающей средой. Преимущественное охлаждение кабельных линий происходит в левой части моста, где наблюдает-

ся прямое движение воздушного потока, таким образом, происходит значительное *обтекание* кабелей потоками воздуха. Максимальная температура приходится на ближний кабель в правой части моста, так как движению ветра препятствует мостовая конструкция, то часть воздушных потоков не достигает кабеля, вследствие этого наблюдается наибольший нагрев. Допустимая токовая нагрузка равна 505 А.

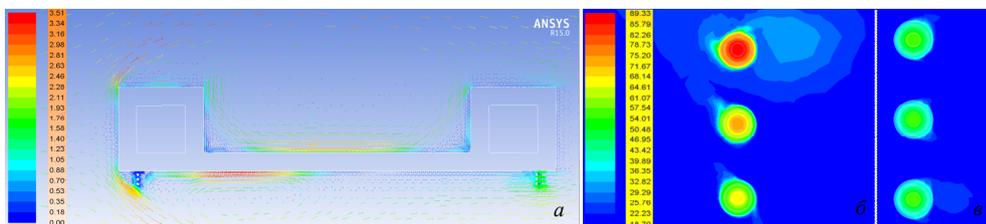


Рис. 6. Прокладка кабельных линий горизонтально под балкой:  
 а – поле распределения скоростей; б – температурное поле левой части; в – температурное поле в правой части балки

**Кабельные линии под балочной конструкцией (горизонтальное расположение).** По векторному полю скоростей воздушного потока (рис.7, а) видно, что наибольшая скорость потока наблюдается слева, что приводит к более интенсивному конвективному теплообмену и, как следствие, меньшей температуре в крайнем левом кабеле (рис.7, б–в). В процессе теплопереноса влиянию подвергаются крайние правые кабели в обеих частях линий, вследствие чего происходит их более интенсивный разогрев. Разница температур составляет 10 °С. Допустимая токовая нагрузка равна 490 А.

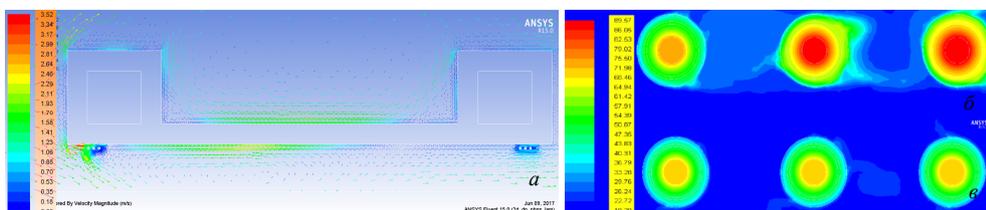


Рис. 7. Прокладка кабельных линий вертикально под балкой:  
 а – поле распределения скоростей; б – температурное поле левой части; в – температурное поле в правой части балки

Анализ показал, что способ прокладки кабельных линий оказывает существенное влияние на предельно допустимую токовую нагрузку. Наименее благоприятным является прокладка линий внутри мостовой

конструкции. Самым рациональным способом является прокладка кабельных линий под мостовой конструкцией. Данный вариант способствует более интенсивному теплообмену кабельных линий с окружающей средой, вследствие чего допустимые токовые нагрузки выше.

#### **Библиографический список**

1. Фридкин И.А. Прокладка силовых кабельных линий. – М.: Энергия, 1976. – 96 с.
2. Акимова Н.А., Котеленец Н.Ф., Сентюрин Н.И. Монтаж, техническая эксплуатация и ремонт электрического и электромеханического оборудования. – М.: Академия, 2008. – 304 с.
3. Даценко В.А., Сивков А.А., Герасимов Д.Ю. Монтаж, ремонт и эксплуатация электрических распределительных сетей в системах электроснабжения промышленных предприятий. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2007. – 132 с.
4. Григорьева М.М., Кузнецов Г.В. Тепломассоперенос в условиях электрической перегрузки кабельных линий // Известия Томск. политехн. ун-та. – 2010. – Т. 316. – № 4. – С. 34–38.
5. Григорьева М.М., Кузнецов Г.В. Численное моделирование температурных полей кабельных линий в условиях электрической перегрузки // Современная техника и технологии: сб. тр. XVI Междунар. науч.-практ. конф. студ., аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – С. 174–175.
6. Определение эксплуатационных характеристик кабелей, проложенных в земле / А.Г. Щербинин, Н.М. Труфанова, Е.Ю. Навалихина, В.Г. Савченко // Электротехника. – 2011. – № 11. – С. 16–20.
7. Труфанова Н.М., Навалихина Е.Ю. Математическое моделирование и управление пропускной способностью кабельных линий в подземном канале // Электротехника. – 2012. – № 11. – С. 11–14.
8. Навалихина Е.Ю. Численное исследование нестационарного режима работы кабельных линий, проложенных в подземном канале // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 3. – С. 38–41.
9. Труфанова Н.М., Навалихина Е.Ю. Управление токовой нагрузкой линий в кабельном канале с учетом сложного теплообмена. Известия Самар. науч. центра Рос. акад. наук. – 2012. – Т. 14. – № 4(5). – С. 1318–1321.

10. Ларина Э.Т. Расчет переходных тепловых процессов одножильного силового кабеля с пластмассовой изоляцией, проложенного в воздухе // *Электротехника*. – 1991. – № 10. – С. 39–42.

11. Hwang C.C., Chang J.J., Chen H.Y. Calculation of ampacities for cables in trays using finite elements // *Electric Power Systems Research*. – 2000. – Vol. 54. – P. 75–81.

12. Vollaro Roberto de Lieto, Fontana Lucia, Vallati Andrea. Thermal analysis of underground electrical power cables buried in non-homogeneous soils // *Applied Thermal Engineering*. – 2011. – Vol. 31. – P. 772–778.

13. Vollaro Roberto de Lieto, Fontana Lucia, Vallati Andrea. Improving evaluation of the heat losses from arrays of pipes or electric cables buried in homogeneous soils // *Applied Thermal Engineering*. – 2011. – Vol. 31. – P. 3768–3773.

14. ТУ 16.К71–335–2004. Кабели силовые с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10, 20, 35 кВ // Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

15. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов. – М.: ФИЗМАТГИЗ, 1959. – 356 с.

16. Numerical calculation on solar temperature field of a cable-stayed bridge with U-shaped section on high-speed railway. LIU Wen-shuo(刘文硕) 1, DAI Gong-lian(戴公连) 1, RAO Shao-chen(饶少臣) 2.

### References

1. Fridkin I.A. Prokladka silovykh kabel'nykh linii [Laying of power cable lines]. Moscow: Energiia, 1976. 96 p.

2. Akimova N.A., Kotelenets N.F., Sentiurikhin N.I. Montazh, tekhnicheskaiia ekspluatatsiia i remont elektricheskogo i elektromekhanicheskogo oborudovaniia [Installation, maintenance and repair of electrical and electromechanical equipment]. Moscow: Akademiia, 2008. 304 p.

3. Datsenko V.A., Sivkov A.A., Gerasimov D.Iu. Montazh, remont i ekspluatatsiia elektricheskikh raspredelitel'nykh setei v sistemakh elektrosnabzheniia promyshlennykh predpriatii [Installation, repair and operation of electrical distribution networks in power supply systems of industrial enterprises]. Tomsk: Tomskii politekhnicheskii universitet, 2007. 132 p.

4. Grigor'eva M.M., Kuznetsov G.V. Teplomassoperenos v usloviakh elektricheskoi peregruzki kabel'nykh linii [Heat and mass transfer in conditions

of electric overload of cable lines]. *Izvestiia Tomskii politekhnicheskii universitet*, 2010, vol. 316, no. 4, pp. 34-38.

5. Grigor'eva M.M., Kuznetsov G.V. Chislennoe modelirovanie temperaturnykh polei kabel'nykh linii v usloviakh elektricheskoi peregruzki [Numerical simulation of temperature fields of cable lines in conditions of electrical overload]. *Sovremennye tekhnika i tekhnologii: sbornik trudov XVI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchennykh. Tomsk: Tomskii politekhnicheskii universitet*, 2010, pp. 174-175.

6. Shcherbinin A.G., Trufanova N.M., Navalikhina E.Iu., Savchenko V.G. Opredelenie ekspluatatsionnykh kharakteristik kabelei, prolozhennykh v zemle [Determining the performance of cables laid in the ground]. *Elektrotekhnika*, 2011, no. 11, pp. 16-20.

7. Trufanova N.M., Navalikhina E.Iu. Matematicheskoe modelirovanie i upravlenie propusknoi sposobnost'iu kabel'nykh linii v podzemnom kanale [Mathematical simulation and bandwidth management of underground cable line]. *Elektrotekhnika*, 2012, no. 11, pp. 11-14.

8. Navalikhina E.Iu. Chislennoe issledovanie nestatsionarnogo rezhima raboty kabel'nykh linii, prolozhennykh v podzemnom kanale [Numerical study of non-steady state of underground cable line time rating]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2013, no. 3, pp. 38-41.

9. Trufanova N.M., Navalikhina E.Iu. Upravlenie tokovoi nagruzkoj linii v kabel'nom kanale s uchetom slozhnogo teploobmena [Controlling the current load of the lines in the cable duct, taking into account the complex heat transfer]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2012, vol. 14, no. 4(5), pp. 1318-1321.

10. Larina E.T. Raschet perekhodnykh teplovykh protsessov odnozhil'nogo silovogo kabelia s plastmassovoi izoliatsiei, prolozhennogo v vozdukh [Calculation of transient thermal processes of a single-core power cable with plastic insulation, laid in the air]. *Elektrotekhnika*, 1991, no. 10, pp. 39-42.

11. Hwang C.C., Chang J.J., Chen H.Y. Calculation of ampacities for cables in trays using finite elements. *Electric Power Systems Research*, 2000, vol. 54, pp. 75-81.

12. Vollaro Roberto de Lieto, Fontana Lucia, Vallati Andrea. Thermal analysis of underground electrical power cables buried in non-homogeneous soils. *Applied Thermal Engineering*, 2011, vol. 31, pp. 772-778.

13. Vollaro Roberto de Lieto, Fontana Lucia, Vallati Andrea. Improving evaluation of the heat losses from arrays of pipes or electric cables buried in homogeneous soils. *Applied Thermal Engineering*, 2011, vol. 31, pp. 3768-3773.

14. TU 16.K71–335–2004. Kabeli silovye s izoliatsiei iz sshitogo poli-etilena na napriazhenie 10, 20, 35 kV [Power cables with XLPE insulation for 10, 20, 35 kV]. Dostup iz spravочно-pravovoi sistemy “Konsul'tantPlius”.

15. Chirkin V.S. Teplofizicheskie svoistva materialov [Thermophysical properties of materials]. Moscow: FIZMATGIZ, 1959. 356 p.

16. Numerical calculation on solar temperature field of a cable-stayed bridge with U-shaped section on high-speed railway. LIU Wen-shuo(刘文硕) 1, DAI Gong-lian(戴公连) 1, RAO Shao-chen(饶少臣) 2.

### Сведения об авторах

**Истомин Никита Владимирович** (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: nike62610@gmail.com).

**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

**Istomin Nikita Vladimirovich** (Perm, Russian Federation) is a Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: nike62610@gmail.com).

**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 30.01.2018