

УДК 621.315.232

Н.М. Труфанова, И.Б. Кухарчук, Н.В. ФеофиловаПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**РАСЧЕТ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ КАБЕЛЬНОГО КАНАЛА
С УЧЕТОМ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В ЭКРАНАХ КАБЕЛЕЙ**

Исследовался процесс тепломассопереноса в кабельном канале с 18 кабельными линиями, каждая из которых состоит из трех кабелей с площадью сечения жилы 150 мм^2 , расположенных в трубе. На основе метода конечных элементов разработана двумерная математическая модель теплового поля подземного кабельного канала. Были получены картины распределения температуры в кабельном канале и окружающем грунте для различных вариантов загрузки кабельных линий.

Для оценки влияния тепловых потерь в медном экране кабеля получены зависимости максимальной температуры жилы кабеля от величины тока. Рассмотрены варианты с учетом и без учета тепловыделений в экране.

В работе исследована возможность замены многослойной конструкции кабеля на эквивалентный слой с целью упрощения счетной модели. Определены максимальные температуры, получены температурные поля в кабельной линии для различных значений токовой нагрузки при многослойной структуре и эквивалентном слое.

В работе рассматривается вопрос о выборе расположения резервных линий. Построено температурное поле для случая полной загрузки всех кабелей с целью определения линий, находящихся в худших температурных условиях. Целесообразность выбора определенных линий в качестве резервных доказана путем расчета максимальных температур жил кабелей. С учетом всех полученных выводов были подобраны максимальные нагрузочные режимы для каждой кабельной линии при условии, что температуры жил кабелей не превышают максимально допустимых значений. Поставленная задача решалась методом конечных объемов в среде инженерных расчетов Fluent.

Ключевые слова: тепловое поле, потери в экране, эквивалентный слой, резервные линии.

N.M. Trufanova, I.B. Kukharchuk, N.V. Feofilova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**CALCULATION OF THE CABLE CHANNEL THERMAL
FIELD TAKING INTO ACCOUNT THERMAL LOSSES
IN THE SHIELD OF CABLES**

In this paper, the process of heat and mass transfer in the cable channel with 18 cable lines, each of which consists of three cables with a core cross-sectional area of 150 mm^2 located in the pipe, was studied. Based on the finite element method, a two-dimensional mathematical model of the thermal field of an underground cable channel is developed. The temperature distribution fields in the cable channel and the surrounding ground for different cable lines loading variants were obtained.

To assess the effect of heat loss in the copper cable screen the dependences of the maximum temperature of the cable core on the current value are obtained. Options with and without heat loss in the screen are considered.

In the work the possibility of replacing a layered cable design for the equivalent layer for the purpose of simplification of the accounting model is analyzed. Maximum temperature values and temperature fields in the cable line for different values of the current load at the multilayer structure and equivalent layer are obtained.

In this paper, the question of choosing the location of backup lines is considered. The temperature field for the case of full load of all cables is built to determine the lines, which are in the worst temperature conditions. The expediency of choosing certain lines as backup lines is proved by calculating the maximum temperature of the cable cores. Taking into account all the findings, the maximum load conditions for each cable line, provided that the cable core temperatures do not exceed the maximum permissible values, were selected. The task was solved using the finite volume method in the engineering calculations environment Fluent.

Keywords: thermal field, losses in the shield, equivalent layer, reserve lines.

Подземное расположение кабельных линий широко используется в районах городской застройки. Кабели могут быть расположены непосредственно в земле, в траншеях, а также в кабельных блоках, трубах и лотках. При расчете нагрузочных режимов приходится сталкиваться с тем, что стандарт по расчету номинальной токовой нагрузки не учитывает все возможные варианты конструкции кабельных каналов. Следствием этого является неоптимальное использование пропускной способности кабельных линий.

Тепловой анализ кабельного канала является важным аспектом проектирования систем электроснабжения. Работы [1–4] посвящены определению предельно допустимых токов, сечений экранов и эксплуатационных характеристик, а также выбору оптимальных вариантов прокладки кабелей в условиях рабочего режима. В работах [5, 6] рассматривается тепловой режим работы линии при перегрузке и коротком замыкании. Нестационарную задачу тепломассопереноса исследуют в работах [7–9]. В работах [10, 11] рассмотрен аналитический подход к расчету передаваемой мощности кабелей в условиях циклического изменения нагрузки. На распределение температуры в кабельной линии и, как следствие, на нагрузочную способность кабелей оказывают существенное влияние свойства окружающей среды. Работы [12–15] посвящены исследованию влияния на температурный режим кабельной линии теплопроводности и влажности окружающего грунта и засыпки. В работах [16, 17] рассматриваются задачи тепломассопереноса в кабельных каналах с учетом конвекции и излучения с поверхности земли, а также нагрева почвы солнцем. Работы [18, 19] посвящены анализу процесса тепломассопереноса в трубе с кабелем без вентиляции и с ней.

При определении токовой нагрузки кабельных линий необходимо учитывать множество факторов для обеспечения безаварийных условий работы. Численное моделирование различных режимов эксплуатации кабельных линий позволяет определить участки, на которых могут возникать повышенные температуры.

В данной работе рассматривается подземный кабельный канал, состоящий из 18 кабельных линий, проложенных в полиэтиленовых трубах. Каждая линия состоит из трех кабелей АПвВнг-LS с сечением жилы 150 мм^2 , расположенных треугольником. На рис. 1 представлено схематичное изображение кабельного канала: линии 1–12 – на напряжение 6 кВ, линии 13–18 – на напряжение 35 кВ.

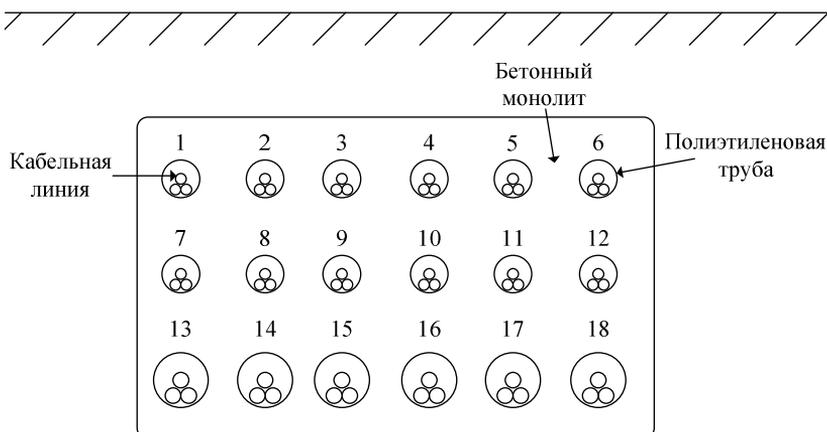


Рис. 1. Схема кабельного канала

Максимально допустимая рабочая температура для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена составляет 90°C [20]. Поскольку максимальная температура изоляции достигается в месте контакта с поверхностью жилы, в качестве точек для контроля нагрева были выбраны поверхности жил кабелей.

Математическая модель тепломассообмена основывается на законах сохранения массы, количества движения и энергии. При расчете процессов тепломассопереноса сделаны следующие допущения: задача стационарная; на границах раздела разнородных сред реализуется условие идеального теплового контакта; реализуется ламинарный режим движения воздуха; воздух в трубе удовлетворяет приближению Буссинеска; свойства материалов постоянны. С учетом сделанных допущений система дифференциальных уравнений имеет вид:

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

$$U_x \frac{\partial U_y}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial U_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial U_y}{\partial y} \right) + g\beta(t-t_0), \quad (2)$$

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

$$\rho c \left(U_x \frac{\partial t}{\partial x} + U_y \frac{\partial t}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda \frac{\partial t}{\partial y}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_k \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_k \frac{\partial}{\partial y} \right) + q_v = 0, \quad (5)$$

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

$$\rho(t) = \rho_0 [1 - \beta(t - t_0)], \quad (7)$$

где x, y – декартовы координаты; U_x, U_y – компоненты вектора скорости воздуха; t – температура; P – отклонения давления воздуха от гироскопического; g – ускорение свободного падения; ρ, μ, λ – плотность, вязкость и теплопроводность воздуха; ρ_0 – плотность воздуха при температуре $t_0 = 20^\circ \text{C}$; q_v – мощность внутреннего источника тепла; β – температурный коэффициент плотности воздуха; λ_k – теплопроводность изоляции кабеля; λ_i – теплопроводность материалов: земля, труба.

Мощность внутренних источников тепла определяется согласно закону Джоуля–Ленца по формуле:

$$q_v = \iint_S \frac{I_1^2}{\sigma_1} dS, \quad (8)$$

где I_1 – номинальный ток токопроводящей жилы кабеля; σ_1 – коэффициент удельной электропроводности токопроводящей жилы кабеля.

Согласно ГОСТ Р МЭК 60278-1-1-2009 при расчете токовой нагрузки для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6 кВ нет необходимости учитывать диэлектрические потери в изоляции. Однако необходимо учитывать потери в металлическом экране, обусловленные наведением токов.

Поставленная задача решалась методом конечных объемов в инженерном пакете Fluent. На рис. 2 представлены полученные зависимости максимальной температуры на поверхности жилы от величины тока с учетом и без учета потерь тепла в медном экране.

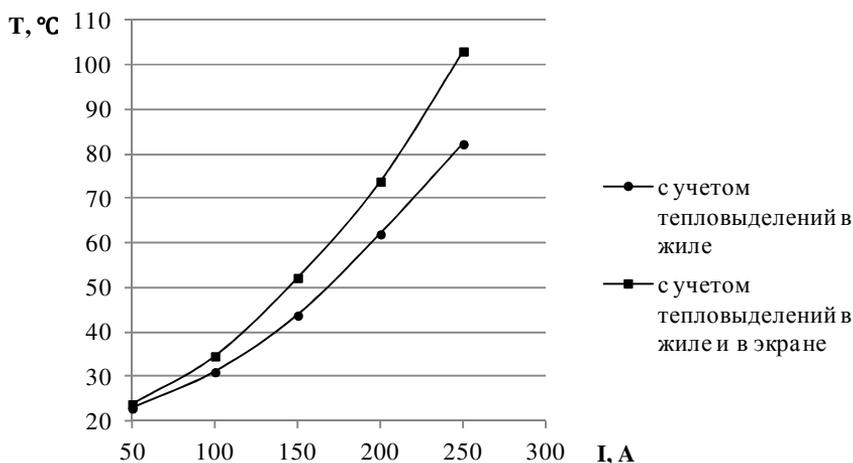


Рис. 2. Зависимости максимальных температур на жилах кабелей от тока

Из полученных данных видно, что с ростом тока влияние тепловых потерь в металлическом экране увеличивается. При определении номинальных токовых нагрузок необходимо учитывать тепловыделения в экранах для обеспечения допустимых температур в изоляции кабеля.

Конструкция кабеля АПВВнг-LS состоит из множества слоев [21]. При численном моделировании сложных кабельных каналов, состоящих из большого числа кабельных линий, целесообразным является замена многослойной конструкции кабеля на эквивалентный слой с усредненными параметрами.

Выражения для определения эквивалентных параметров имеют следующий вид:

$$\lambda_{\text{ЭКВ}} = \frac{\ln\left(\frac{d_n}{d_1}\right)}{\sum_1^n \frac{1}{\lambda_i} \ln\left(\frac{d_i}{d_{i-1}}\right)}, \quad c_{\text{ЭКВ}} = \frac{\ln\left(\frac{d_n}{d_1}\right)}{\sum_1^n \frac{1}{c_i} \ln\left(\frac{d_i}{d_{i-1}}\right)}, \quad \rho_{\text{ЭКВ}} = \frac{\ln\left(\frac{d_n}{d_1}\right)}{\sum_1^n \frac{1}{\rho_i} \ln\left(\frac{d_i}{d_{i-1}}\right)}, \quad (9)$$

где i – номер слоя, d_i – диаметр i -го слоя, λ_i , c_i , ρ_i – теплопроводность, удельная теплоемкость, плотность i -го слоя.

Поскольку в эквивалентном слое отсутствует экран, мощность тепловыделений экрана необходимо добавить к мощности тепловыделений жилы. Поправочный коэффициент для определения общей тепловой мощности (экран и жила) определяется из соотношения площадей сечения жилы и экрана:

$$k = \frac{35}{150} = 0,23.$$

В табл. 1 представлены значения максимальной температуры в кабельном канале для различной токовой нагрузки при рассмотрении многослойной конструкции кабеля и кабеля с эквивалентным слоем.

Таблица 1

Значения максимальной температуры

Ток, А	Температура на жиле при многослойной конструкции, °С	Температура на жиле при эквивалентном слое, °С
50	23,9	24
100	34,6	35,2
150	52,2	53
200	73,8	76

На рис. 3 представлены температурные поля в кабельной линии при использовании многослойной конструкции и эквивалентного слоя.

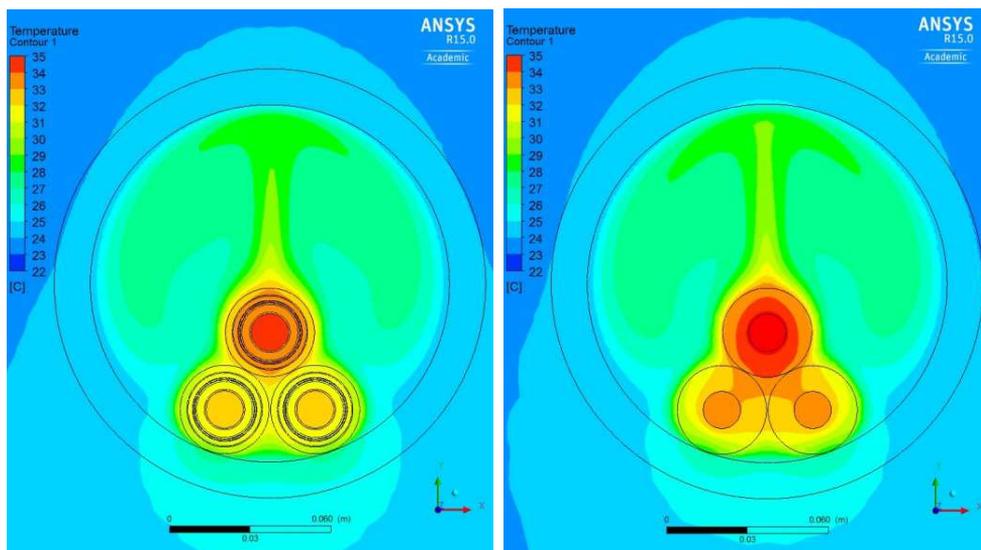


Рис. 3. Температурные поля в кабельной линии при многослойной структуре и эквивалентном слое

Как видно из полученных результатов, значения максимальной температуры и распределение температуры по кабельной линии для рассматриваемых вариантов расчета согласуются достаточно хорошо. Следовательно, можно сделать вывод о допустимости использования конструкции с эквивалентным слоем для построения расчетных областей кабельных каналов.

При расчете распределения температур в канале для различных режимов нагрузки необходимо учитывать, что согласно «Правилам устройства электроустановок» (7-е изд.) каждый кабельный канал должен иметь до 15 % резервных линий [22]. В кабельном канале с количеством линий, равным 18, под резервные необходимо определить 2 кабельные линии. Расположение резервных линий не регламентируется. Целесообразно оставлять ненагруженными линии, находящиеся в худших температурных условиях. На рис. 4 представлено температурное поле кабельного канала при условии загрузки всех кабельных линий.

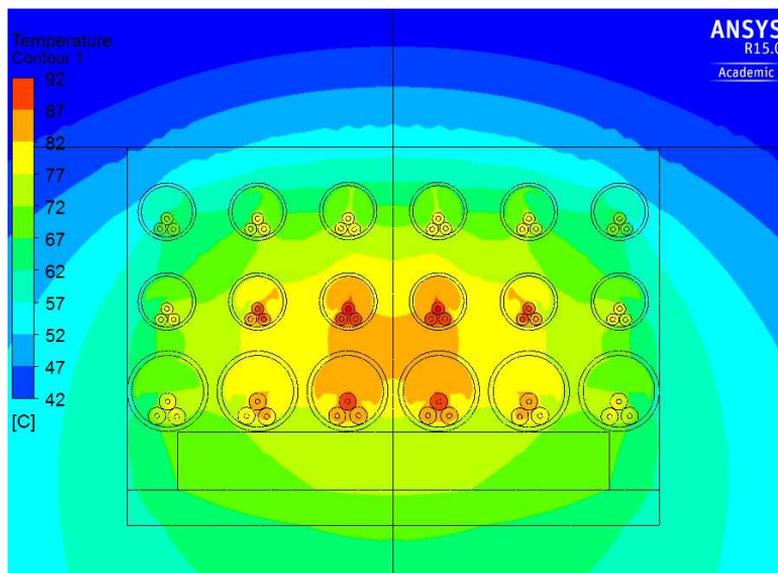


Рис. 4. Температурное поле кабельного канала при условии загрузки всех кабельных линий

Как видно из результатов, самыми нагретыми являются кабельные линии, расположенные в центре канала. Рассмотрены два варианта отключения линий: 2 центральные линии в среднем ряду и 2 центральные линии в нижнем ряду. На рис. 5 и 6 представлены температурные поля для данных вариантов.

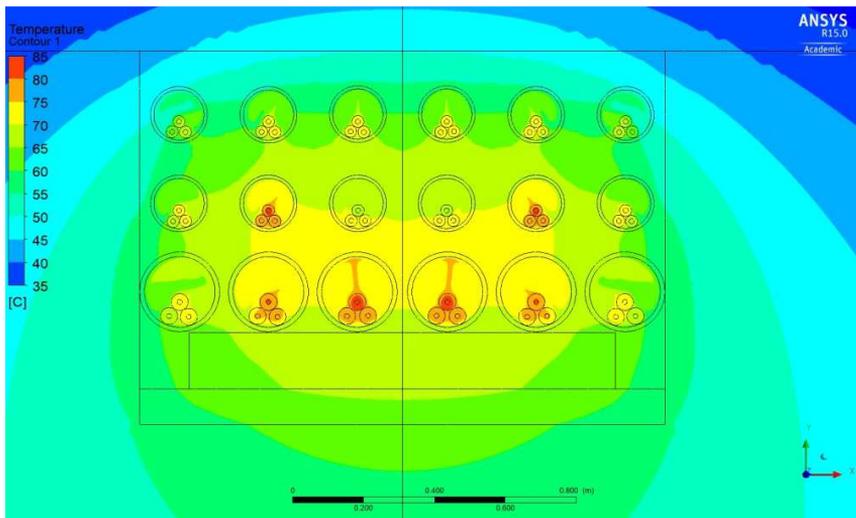


Рис. 5. Температурное поле канала при отключении резервных линий в среднем ряду

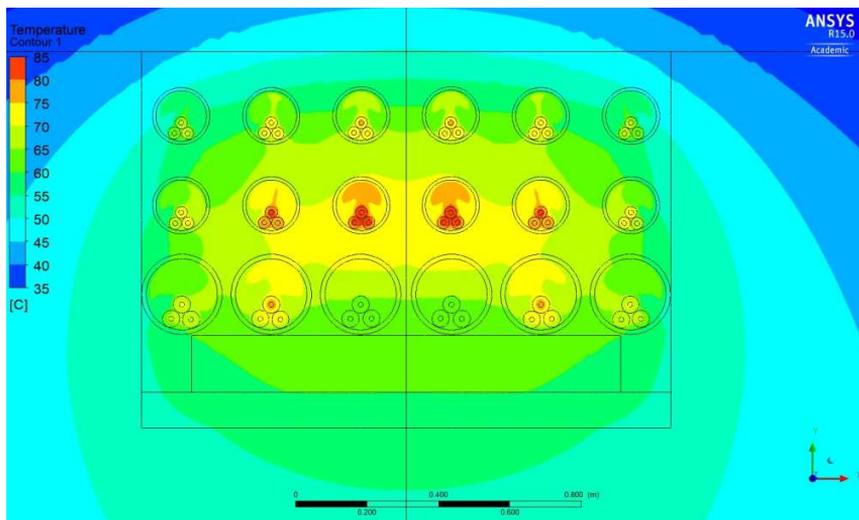


Рис. 6. Температурное поле канала при отключении резервных линий в нижнем ряду

Максимальная температура в первом случае составила 82°C , во втором 85°C . Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о целесообразности выбора в качестве резервных центральные линии среднего ряда канала.

С учетом сделанных расчетов были подобраны максимальные нагрузочные режимы для каждой кабельной линии, при которых

не превышаются предельно допустимые температуры. На рис. 7 представлено температурное поле кабельного канала при максимальной загрузке всех рабочих линий.

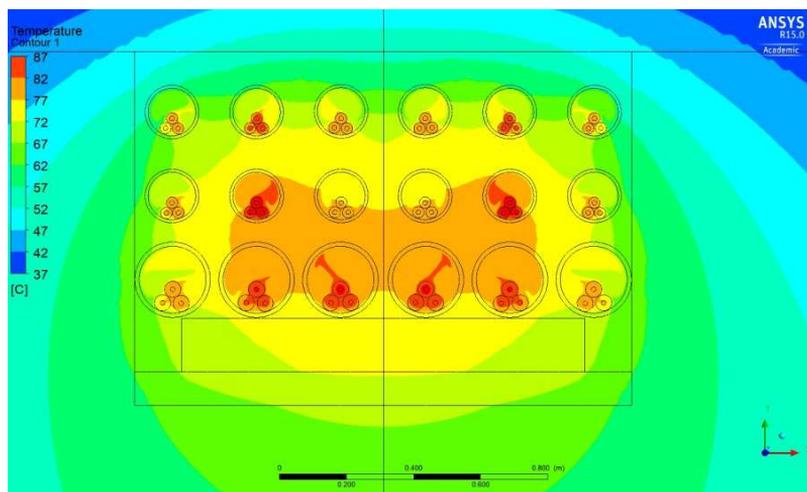


Рис. 7. Температурное поле кабельного канала при максимально допустимой загрузке всех рабочих линий

В табл. 2 представлены полученные результаты максимально допустимых значений перетока мощности по каждой линии и суммарная мощность, передаваемая по каналу.

Таблица 2

Передаваемая мощность

Номер кабельной линии	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Мощность, кВА	1370,2	1141,8	830	830	1141,8	1370,2	799	830,4	0
Номер кабельной линии	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Мощность, кВА	0	830,4	799	6539	4844	4481	4481	4844	6539
Суммарная передаваемая мощность, МВА									41,67

Выполненные расчеты показывают целесообразность использования моделирования работы кабельных каналов с целью определения условий эксплуатации для различных режимов нагрузки. Полученные результаты могут быть использованы для систем автоматизации и контроля работы кабельных линий.

Библиографический список

1. Грешняков Г.В., Ковалеров Г.Г., Дубицкий С.Д. К вопросу о выборе предельно допустимых токов силовых кабелей // Кабели и провода. – 2011. – № 6. – С. 12–16.
2. Дмитриев М.В. Выбор сечения экранов однофазных силовых кабелей // Кабель_news. – 2009. – № 5. – С. 69–73.
3. 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.
4. Vahid Abbasi, Hossien Heydari, Faramarz Faghihi. Heuristic mathematical formulations and comprehensive algorithm for optimal decision making for power system cabling // Scientia Iranica D. – 2012. – № 19(3). – P. 707–720.
5. Dmitriev V., Gonzalez L. Electrical and thermal analysis on optical ground wire cables in short_circuit regime by coupled equations // Electric Power Systems Research. – 2013. – Vol. 201. – P. 80–87. DOI: 10.1016/j.epsr.2013.03.015
6. 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.
7. Thermal Analysis of Cables in Unfilled Troughs: Investigation of the IEC Standard and a Methodical Approach for Cable Rating / Matthew Terracciano, Sujit Purushothaman, Francisco de Leon, Alireza Vashghani // IEEE Transactins on power delivery. – 2012. – Vol. 27. – No. 3. – P. 1423–1431. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2192138
8. Дубяго М.Н., Полуянович Н.К., Пшихопов В.Х. Метод исследования термофлуктуационных процессов в задачах диагностики и прогнозирования изоляционных материалов // Вестник Донского гос. техн. ун-та. – 2017. – № 3(90). – С. 117–127.
9. Труфанова Н.М., Будаян В.А. Нестационарная задача тепломассопереноса при прокладке кабеля в зданиях и сооружениях // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2017. – № 23. – С. 5–16.
10. Optimal position of buried power cables / De Mey G., Xynis P., Papagiannopoulos I., Chatziathanasiou V., Exizidis L., Wiecek B. // Elektronika IR Elektrotehnika. – 2014. – Vol. 20. – No. 5. – P. 37–40. – URL: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.20.5.7097>

11. Shahriar Saadat, Akim Borbuev, Francisco de Leon. Thermal analysis of power cables installed in solid bottom trays using an equivalent circuit // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2017. – Vol. 32. – Iss. 4. – P. 2130–2139. DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2602184

12. Anders G.J., Radhakrishna H.S. Power cable thermal analysis with consideration of heat and moisture transfer in the soil // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1988. – Vol. 3. – Iss. 4. – P. 1280–1288. DOI: 10.1109/61.193921

13. Francisco de Leon, George J. Anders. Effects of backfilling on cable ampacity analyzed with the finite element method // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – Vol. 23. – Iss. 2. – P. 537–543. DOI: 10.1109/TPWRD.2008.917648

14. Aluru Divya Teja, Rajagopala K. Thermal analysis by conduction convection and radiation in a power cable // IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering. – 2014. – Vol. 9. – Iss. 3. – Ver. II. – P. 51–56.

15. Kukharchuk I.B., Kazakov A.V., Trufanova N.M. Investigation of heating of 150 kV underground cable line for various conditions of laying // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 327. – URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/327/2/022041/pdf>. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022041

16. Nahman J., Tanaskovic M. Determination of the current carrying capacity of cables using the finite element method // Electric Power Systems Research. – 2002. – Vol. 61. – Iss. 2. – P. 109–117. – URL: [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(02\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(02)00003-2)

17. Nahman J., Tanaskovic M. Calculation of the ampacity of high voltage cables by accounting for radiation and solar heating effects using FEM // International Transactions on Electrical Energy Systems. – 2013. – Vol. 23. – Iss. 3. – P. 301–314. DOI: 10.1002/etep.660

18. Tsui Y.T. On heat transfer between cable and its surrounding pipe or duct wall // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1983. – Vol. PAS-102. – Iss. 5. – P. 1249–1252. DOI: 10.1109/TPAS.1983.318070

19. Mock-up study of the effect of wall distance on the thermal rating of power cables in ventilated tunnels / F. Boukrouche, C. Moreau, J. Pelle, F. Beaubert, S. Harmand, O. Moreau // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2017. – Vol. 32. – Iss. 6. – P. 2453–2461. DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2629285

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

21. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Управление токовой нагрузкой линии в кабельном канале с учетом сложного теплообмена // Известия Самар. науч. центра Рос. акад. наук. – 2012. – Т. 14. – № 4(5). – С. 1318–1321.

22. Халитов В. Кабели со СПЭ-изоляцией. Расчет блочной канализации // Новости Электротехники. – 2017. – № 5(107)–6(108). – С. 72–78.

References

1. Greshniakov G.V., Kovalerov G.G., Dubitskii S.D. К вопросу о выборе предельно допустимых токов силовых кабелей [On the issue of choosing the maximum permissible currents of power cables]. *Kabeli i provoda*, 2011, no. 6, pp. 12-16.

2. Dmitriev M.V. Выбор сечения экранов однофазных силовых кабелей [Selecting the cross section of single-phase power cable screens]. *Kabel'-news*, 2009, no. 5, pp. 69-73.

3. Shcherbinin A.G., Trufanova N.M., Navalikhina E.Iu., Savchenko V.G. Определение эксплуатационных характеристик кабелей, проложенных в земле [Determining the performance of cables laid in the ground]. *Elektrotehnika*, 2011, no. 11, pp. 16-20.

4. Vahid Abbasi, Hossien Heydari, Faramarz Faghihi. Heuristic mathematical formulations and comprehensive algorithm for optimal decision making for power system cabling. *Scientia Iranica D*, 2012, no. 19(3), pp. 707-720.

5. Dmitriev V., Gonzalez L. Electrical and thermal analysis on optical ground wire cables in short_circuit regime by coupled equations. *Electric Power Systems Research*, 2013, vol. 201, pp. 80-87. DOI: 10.1016/j.epsr.2013.03.015

6. Grigor'eva M.M., Kuznetsov G.V. Тепломассоперенос в условиях электрической перегрузки кабельных линий [Heat and mass transfer in conditions of electric overload of cable lines]. *Izvestiia Tomskskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2010, vol. 316, no. 4, pp. 34-38.

7. Matthew Terracciano, Sujit Purushothaman, Francisco de Leon, Alireza Vashghani. Thermal Analysis of Cables in Unfilled Troughs: Inves-

tigation of the IEC Standard and a Methodical Approach for Cable Rating. *IEEE Transactins on power delivery*, 2012, vol. 27, no. 3, pp. 1423-1431. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2192138

8. Dubiago M.N., Poluianovich N.K., Pshikhopov V.Kh. Metod issledovaniia termoflukuatsionnykh protsessov v zadachakh diagnostiki i prognozirovaniia izoliatsionnykh materialov [The method of investigation of thermal fluctuation processes in the problems of diagnostics and prediction of insulating materials]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, no. 3(90), pp. 117-127.

9. Trufanova N.M., Budaian V.A. Nestatsionarnaia zadacha teplomassoperenosa pri prokladke kabelia v zdaniiah i sooruzheniiakh [Non-stationary problem of a heatmass transfer when laying a cable in buildings and constructions]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatzionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2017, no. 23, pp. 5-16.

10. De Mey G., Xynis P., Papagiannopoulos I., Chatziathanasiou V., Exizidis L., Wiecek B. Optimal position of buried power cables. *Elektronika IR Elektrotehnika*, 2014, vol. 20, no. 5, pp. 37-40, available at: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.20.5.7097>

11. Shahriar Saadat, Akim Borbuev, Francisco de Leon. Thermal analysis of power cables installed in solid bottom trays using an equivalent circuit. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, vol. 32, iss. 4, pp. 2130-2139. DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2602184

12. Anders G.J., Radhakrishna H.S. Power cable thermal analysis with consideration of heat and moisture transfer in the soil. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1988, vol. 3, iss. 4, pp. 1280-1288. DOI: 10.1109/61.193921

13. Francisco de Leon, George J. Anders. Effects of backfilling on cable ampacity analyzed with the finite element method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, vol. 23, iss. 2, pp. 537-543. DOI: 10.1109/TPWRD.2008.917648

14. Aluru Divya Teja, Rajagopala K. Thermal analysis by conduction convection and radiation in a power cable. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2014, vol. 9, iss. 3, ver. II, pp. 51-56.

15. Kukharchuk I.B., Kazakov A.V., Trufanova N.M. Invastigation of heating of 150 kV underground cable line for various conditions of laying. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 327,

available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/327/2/022041/pdf>. DOI: 10.1088/1757-899X/327/2/022041

16. Nahman J., Tanaskovic M. Determination of the current carrying capacity of cables using the finite element method. *Electric Power Systems Research*, 2002, vol. 61, iss. 2, pp. 109-117, available at: [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(02\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(02)00003-2)

17. Nahman J., Tanaskovic M. Calculation of the ampacity of high voltage cables by accounting for radiation and solar heating effects using FEM. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2013, vol. 23, iss. 3, pp. 301-314. DOI: 10.1002/etep.660

18. Tsui Y.T. On heat transfer between cable and its surrounding pipe or duct wall. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1983, vol. PAS-102, iss. 5, pp. 1249-1252. DOI: 10.1109/TPAS.1983.318070

19. Boukrouche F., Moreau C., Pelle J., Beaubert F., Harmand S., Moreau O. Mock-up study of the effect of wall distance on the thermal rating of power cables in ventilated tunnels. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, vol. 32, iss. 6, pp. 2453-2461. DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2629285

20. TU 16.k71-335-2004. Kabeli silovye s izoljaciej iz sshitogo polijetilena na naprjazhenie 10, 20, 35 kV [Power cables with isolation from the sewed polyethylene on tension 10, 20, 35 kV]. Dostup iz spravocno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.

21. Navalihina E.Ju., Trufanova N.M. Upravlenie tokovoj nagruzkoj linii v kabelnom kanale s uchetom slozhnogo teploobmena [Controlling the current load of the line in the cable duct, taking into account the complex heat transfer]. *Izvestija Samarskogo nauchnogo centra rossijskoj akademii nauk*, 2012, vol. 14, no. 4(5), pp. 1318-1321.

22. Halitov V. Kabeli so SPJE-izoljaciej. Raschet blochnoj kanalizacii [Cables with SPE-insulation. Calculation of the block sewage system]. *Novosti Jelektrotehniki*, 2017, no. 5(107)-6(108), pp. 72-78.

Сведения об авторах

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).

Кухарчук Ирина Борисовна (Пермь, Россия) – аспирантка кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр-т, 29, e-mail: kuharchuk_ib@mail.ru).

Феофилова Наталья Владимировна (Пермь, Россия) – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр-т, 29, e-mail: Natasha_feofilova@mail.ru).

About the authors

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).

Kukharchuk Irina Borisovna (Perm, Russian Federation) is a Graduate Student of the Department of designing and technology in electrical equipment Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: kuharchuk_ib@mail.ru).

Feofilova Natal'ia Vladimirovna (Perm, Russian Federation) is a Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: Natasha_feofilova@mail.ru).

Получено: 08.10.2018