

УДК 621.315.2.016.2

Н.М. Труфанова, В.А. БудаянПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**НЕСТАЦИОНАРНАЯ ЗАДАЧА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА
ПРИ ПРОКЛАДКЕ КАБЕЛЯ В ЗДАНИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ**

Решается задача сложного тепломассопереноса при прокладке кабеля в зданиях и сооружениях. Предложенная математическая модель процессов сложного тепломассопереноса основывается на законах сохранения массы, количества движения и энергии. Поставленная задача решалась численно в условиях естественной конвекции методом конечных элементов в инженерном программном пакете Ansys Fluent. В результате получены мощности тепловых потерь в металлических элементах конструкции силового кабеля, поля температур для различной величины тока. Представлены и проанализированы численные результаты полученных температурных полей в месте прокладки силовых кабелей. Решена проблема разгрузки кабельной линии при запуске оборудования противопожарных систем.

Ключевые слова: моделирование, тепломассоперенос, нестационарная задача, прокладка кабеля, разгрузка, автоматизация, лучистый теплообмен, конвекция, длительно допустимый ток, нагрев изоляции.

N.M. Trufanova, V.A. Budayan

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**NON-STATIONARY PROBLEM OF A HEATMASS TRANSFER
WHEN LAYING A CABLE IN BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS**

This work is devoted to solving the problem together convective complex heat and mass transfer at various ways of laying of power cables in buildings and constructions. The mathematical model of the processes of complex heat and mass transfer based on the laws of conservation of mass, momentum and energy. The problem is solved numerically under conditions of natural convection of the finite element method in engineering software package Ansys Fluent. As a result, the numerical solution of obtained power of heat loss in metal structural elements of the power cable, temperature fields at various value of current. Presented and analyzed the numerical results obtained temperature fields field in a place of power cables laying. The problem of unloading of the cable line at start of the equipment of fire-prevention systems is solved.

Keywords: modeling, a heatmass transfer, a non-stationary problem, laying of a cable, unloading, automation, radiant heat exchange, convection, is long admissible current, isolation heating.

Для определения величины допустимой токовой нагрузки в заданных условиях прокладки широко используются экспериментальные методы [1]. Проведение натурных исследований позволяет установить множество зависимостей между величиной тока нагрузки, количеством прокладываемых кабелей и способом их укладки. Наряду с экспериментальными исследованиями для определения этих зависимостей применяют численные модели для решения стационарных задач тепломассопереноса в помещениях с кабельными лотками [2–6]. Применяемые численные модели позволяют определить возможность расширения нагрузочной способности кабельных линий при проведении их реконструкции, принять решение о возможности добавления новых линий в существующие каналы и об их влиянии на температурный режим в кабельном сооружении [6].

Решение нестационарных задач тепломассопереноса [2] позволяет производить анализ температурных полей в местах прокладки кабелей: траншеях, кабельных каналах, на эстакадах и пр. Результат такого анализа может быть использован для определения величины допустимых токовых нагрузок и принятия решения об управлении нагрузкой кабельных линий.

1. Моделирование тепломассопереноса. Для определения токовых нагрузок, при которых происходит нагрев элементов кабеля до предельно допустимых температур, необходимо разработать и реализовать математическую модель процессов тепломассопереноса в кабельной линии и окружающем ее пространстве. При решении задачи учитывалась естественная конвекция воздуха во внутритрубном пространстве.

Математическая модель движения и теплопереноса для рассматриваемого объекта основывается на законах сохранения массы, количества движения и энергии [7–8].

При создании модели сделаны следующие допущения:

- теплофизические свойства твердых материалов постоянны;
- течение воздушных масс ламинарное.

Процесс тепломассопереноса описывается следующими дифференциальными уравнениями:

– уравнение движения воздуха:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U_x}{\partial \tau} + U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} + U_z \frac{\partial U_x}{\partial z} = \\ & = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial U_x}{\partial z}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U_y}{\partial \tau} + U_x \frac{\partial U_y}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_y}{\partial y} + U_z \frac{\partial U_y}{\partial z} = \\ & = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial U_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial U_y}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{g\beta(T-T_0)}{\rho}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial U_z}{\partial \tau} + U_x \frac{\partial U_z}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_z}{\partial y} + U_z \frac{\partial U_z}{\partial z} = \end{aligned} \quad (2)$$

$$= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial U_z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial U_z}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial U_z}{\partial z},$$

– уравнение неразрывности:

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

– уравнение энергии для воздуха:

$$\rho_b c_b \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + U_x \frac{\partial t}{\partial x} + U_y \frac{\partial t}{\partial y} + U_z \frac{\partial t}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \lambda_b \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda_b \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda_b \frac{\partial t}{\partial z}, \quad (4)$$

– уравнение теплопроводности для кабельных линий:

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

– уравнение теплопроводности для твердых материалов:

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

Плотность воздуха зависит от температуры по закону Буссинеска:

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

где x, y, z – декартовы координаты; U_x, U_y, U_z – компоненты вектора скорости воздуха в канале; t – температура, °C; P – отклонение давления воздуха от гироскопического; g – ускорение свободного падения; ρ_b, μ_b, c_b – плотность, вязкость и теплоемкость воздуха; ρ_0 – плотность воздуха при $t_0 = 20$ °C, q_v – мощность внутреннего источника тепла; β – температурный коэффициент плотности воздуха; $\lambda_b, \lambda_n, \lambda_i$ –

теплопроводность воздуха, изоляции и твердых материалов прокладки соответственно [9].

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

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

где I_1 – номинальный ток жилы силового кабеля (А); σ_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 задаются граничные условия четвертого рода и условия сопряжения температур;
- на границах расчетной области задаются условия установившегося теплообмена;
- в начальный момент времени температура принимается равной 25 °С (298 К).

Конвективный теплообмен дополняется энергией излучения между сегментами поверхностей, являющимися границами областей. Воздух трактуется как прозрачная среда, не поглощающая тепловое излучение, а граничные поверхности, участвующие в теплообмене, как поверхности с определенной степенью черноты. Расчет суммарной плотности радиационного потока на поверхностях выполняется матричным методом. Плотность эффективного излучения сегмента поверхности определяется по формуле

$$J_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) F_{i-j} J_j, \quad (9)$$

где J_i – излучение сегмента j , Вт/м²; F_{i-j} – угловой коэффициент от поверхности i к поверхности j ; ε_i – степень черноты поверхности i ; T_i – температура i -го сегмента поверхности, К; σ – постоянная Стефана–Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴). Суммарная плотность радиационного потока на любом сегменте поверхности i вычисляется по следующей формуле:

$$q_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 - \varepsilon_i \sum_j^N F_{i-j} J_j. \quad (10)$$

Плотность радиационного потока рассчитывается по уравнению (10) с помощью итерационной процедуры с использованием значений J_i , полученных из системы уравнений (9), и линеаризованных членов T_i^4 , ограничиваясь первыми двумя членами его разложения в ряд Тейлора относительно T_i^4 :

$$T_i^4 = 4 \left(T_i \Big| ^k \right)^3 T_i \Big|^{k+1} - \left(T_i \Big| ^k \right)^4, \quad (11)$$

где $T_i \Big| ^k$ – температура сегмента поверхности из предыдущей итерации k .

2. Исследование нештатных режимов работы кабельных линий, проложенных в трубах. Система электроснабжения центрального теплового пункта двух шестнадцатиэтажных домов, расположенного в цокольном этаже пристроенного здания. ЦТП, обеспечивает водо- и теплоснабжение [10, 11]. Перечень основного электротехнического оборудования приведен в таблице*.

Технические данные оборудования

№	Наименование	Мощность, кВт	Режим работы	Номинальный ток, А
1	Насос ХВС	4,0	Длительный	7,57
2	Насос ГВС	4,0	Длительный	7,57
3	Насос отопления	7,5	Длительный	14,20
4	Циркуляционный насос ГВС	1,5	Длительный	2,84
5	Подпиточный насос отопления	1,5	Кратковременный	2,84
6	Насос противопожарный	15,0	Длительный	28,4
7	Системы управления насосами	0,18	Длительный	0,9
8	Освещение дежурное	0,04	Длительный	0,2
9	Освещение рабочее	0,24	Длительный	1,1

3. Рассмотрение вопроса необходимости разгрузки. В нормальном режиме работы в водо- и теплоснабжении задействованы насосы горячего и холодного водоснабжения, насос отопления и циркуляционный насос горячего водоснабжения. Токовая нагрузка на систему электроснабжения составляет 34,4 А. При срабатывании противопожарной сигнализации запускается противопожарный насос, обеспечивающий подачу воды в систему пожарных гидрантов. Запуск противопожарных систем приводит к увеличению токовой нагрузки на 28,4 А, что составляет 83 % от нагрузки в штатном режиме работы оборудования центрального теплового пункта.

* СНиП 3.05.06-85. Электротехнические устройства. Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.

Запуск противопожарного оборудования без разгрузки сети приводит к увеличению величины токовой нагрузки до 62,8 А. Система электроснабжения выполнена с использованием счетчиков электроэнергии прямого включения ЦЭ2727 с номинальным током 100 А. Подключение счетчика выполнено кабелем АВВГ 4×16, проложенным в гофрированной трубе диаметром 50 мм из ПВХ пластика серого цвета (для прокладок внутри помещений)** . Длительно допустимый ток для данного кабеля, при прокладке в воздухе, составляет 62,3 А*** .

Включение противопожарного оборудования приводит к превышению величины длительно допустимого тока для некоторых элементов системы электроснабжения на 0,8 %. Необходимо определить влияние данного фактора на систему электроснабжения с учетом особенностей прокладки кабеля к прибору учета электроэнергии**** .

4. Моделирование тепломассопереноса в режиме перегрузки.

В режиме перегрузки задача имеет нестационарный характер и решается в два этапа:

– исследование процесса тепломассопереноса при нагревании кабеля номинальными токами из холодного состояния (температура окружающей среды 25 °С);

– исследование процесса тепломассопереноса при нагревании кабеля током перегрузки (запущено противопожарное оборудование), на начало процесса кабель и окружающие элементы нагреты до температуры, соответствующей протеканию номинальных токов.

В результате решения поставленных задач получена зависимость температуры изоляции кабеля от времени (рис. 1).

Работа оборудования в номинальном режиме сопровождается нагревом изоляции кабеля до 40 °С. При включении противопожарных систем без разгрузки сети происходит перегрев изоляции кабеля, температура изоляции повышается до 70 °С за 20 мин работы и устанавливается на отметке 80 °С по истечении 50 мин с момента запуска оборудования (рис. 2).

** ГОСТ 31996-2012. Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение 0,66; 1 и 3 кВ // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.

*** ГОСТ Р МЭК 60287-2009. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.

**** Правила устройства электроустановок. 7-е изд. / ВНИПИ Тяжпромэлектропроект. – М., 1999.

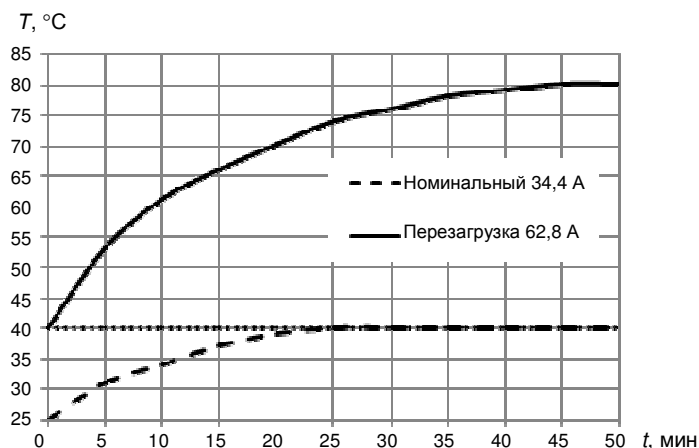


Рис. 1. Нагрев изоляции в номинальном режиме и при перегрузке

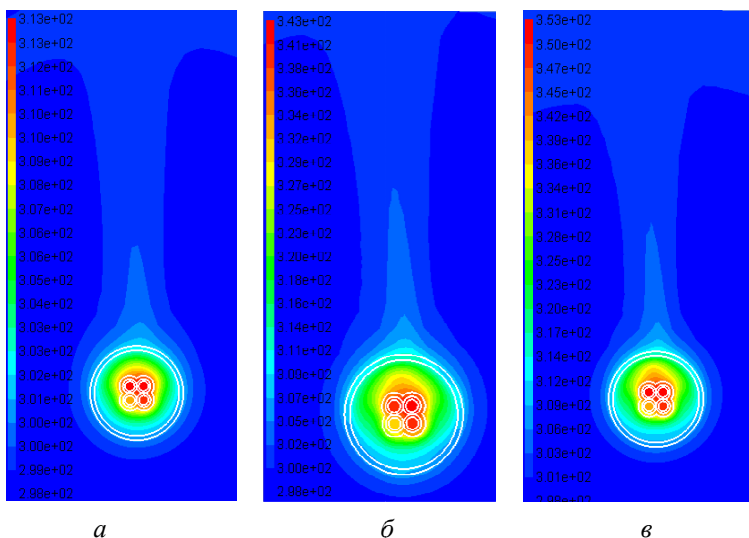


Рис. 2. Поля температур: *а* – номинальный режим, *б* – через 20 мин после начала перегрузки, *в* – установившееся значение для перегрузки

Для решения проблемы перегрузки во время работы противопожарного оборудования может быть применена автоматическая разгрузка. При применении автоматической разгрузки необходимо обеспечить отключение потребителей с большой мощностью, работа которых может быть прервана без ущерба для эксплуатируемых сетей и потребителей.

При применении в качестве решения проблемы перегрузки автоматической разгрузки допускается отключение насоса отопления (7,5 кВт) продолжительностью до 4 ч. При этом нагрузка на питающую

сеть снизится с 62,8 до 48,6 А, что может предотвратить перегрев изоляции питающего кабеля. Приведена кривая изменения температуры изоляции при включении режима разгрузки, величина тока – 48,6 А (рис. 3).

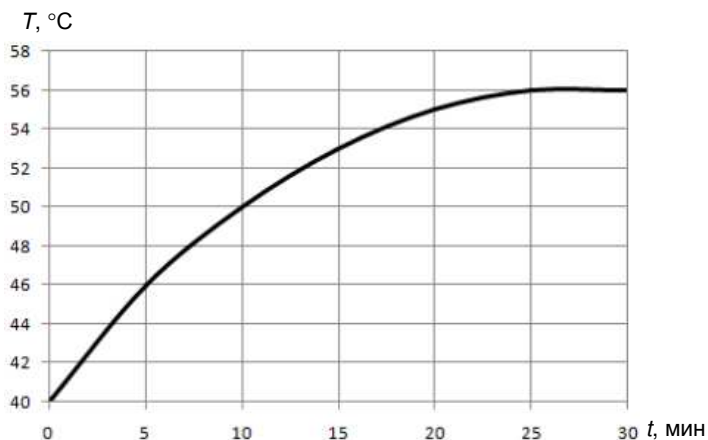


Рис. 3. Нагрев изоляции при применении разгрузки

Видно, что после применения разгрузки температура изоляции кабеля не превышает 56 °С, что является допустимым значением.

При работе системы автоматической разгрузки после запуска противопожарного оборудования и длительности его работы не менее 20 мин произойдет автоматическое отключение насоса отопления. Величина тока нагрузки снизится до 48,6 А, что приведет к снижению температуры изоляции с 70 до 56 °С в течение 50 мин (рис. 4, 5).

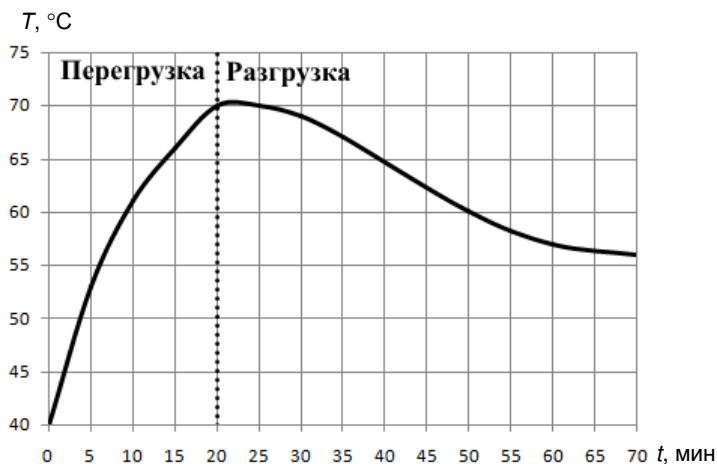


Рис. 4. Изменение температуры изоляции кабеля при автоматической разгрузке

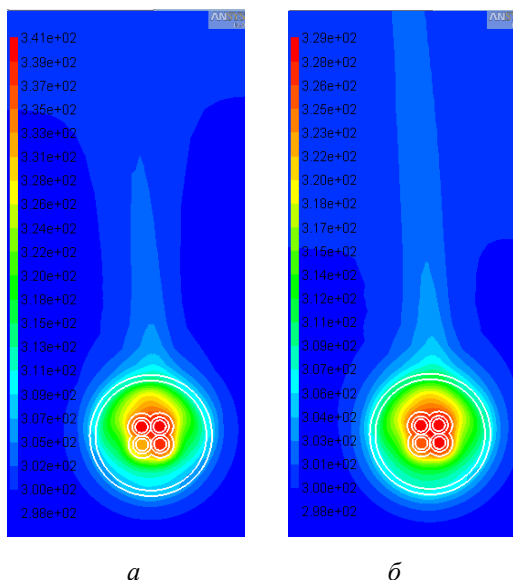


Рис. 5. Температурные поля при разгрузке:
а – через 10 мин после начала разгрузки,
б – через 50 мин после начала разгрузки

Выводы. Применение нестационарных моделей теплопередачи при анализе температурных режимов работы кабелей и проводов в условиях прокладки в зданиях и сооружениях позволяет решить вопросы выбора аппаратов защиты от токов перегрузки, наиболее благоприятных условий прокладки, а также предупредить возникновение аварийных ситуаций при перегреве изоляции токопроводящих жил.

На основе полученных моделей произведен анализ изменения температуры изоляции при запуске оборудования с наибольшей мощностью и предложено решение проблемы перегрузки элементов питающей сети путем разгрузки с применением средств автоматики. Полученные зависимости температуры позволяют принимать решение о снижении нагрузки в наиболее критичный момент времени (при достижении максимально допустимой температуры).

Библиографический список

1. Терлыч А.Е., Щербинин А.Г., Экспериментальное исследование влияния способа прокладки на величину допустимой токовой нагрузки и процессы охлаждения силовых кабелей // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 4. – С. 118–121.

2. Навалихина Е.Ю. Численное исследование нестационарного режима работы кабельных линий, проложенных в подземном канале // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 3. – С. 38–41.

3. Щербинин А.Г., Стариков С.В. Исследование влияния способов укладки кабельных линий на их пропускную способность // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 4. – С. 126–128.

4. Щербинин А.Г., Гушин А.В., Математическое моделирование процессов тепломассопереноса кабельных линий напряжением 0,4 кВ // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 4. – С. 154–156.

5. Труфанова Н.М., Навалихина Е.Ю. Математическое моделирование и управление пропускной способностью кабельных линий в подземном канале // Электротехника. – 2012. – № 11. – С. 11–14.

6. Расчет охлаждения кабеля в канале с учетом конвективного тепломассообмена и теплового излучения / А.В. Казаков, А.Г. Щербинин, Н.М. Труфанова, В.Г. Савченко // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2010. – № 4. – С. 4–11.

7. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.

8. Щербинин А.Г., Черняев В.В. Теплопередача: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014.

9. Теплопроводность и теплофизические свойства веществ и материалов [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.thermalinfo.ru> (дата обращения: 19.05.2017).

10. Еремкин А.И., Королева Т.И. Тепловой режим зданий: учеб. пособие. – М.: АСВ, 2000. – 368 с.

11. Зевин М.Б., Трифионов А.Н. Производство и распределение электрической энергии. – М.: Высшая школа, 1984. – 239 с.

References

1. Terlych A.E., Shcherbinin A.G., Eksperimental'noe issledovanie vliianiia sposoba prokladki na velichinu dopustimoi tokovoi nagruzki i protsessy okhlazhdeniia silovykh kabelei [Pilot study of the laying method influence on the current carrying capacity and power supply cables cooling actions]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2015, no. 4, pp. 118-121.

2. 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.

3. Shcherbinin A.G., Starikov S.V. Issledovanie vliianiia sposobov ukladki kabel'nykh linii na ikh propusknuiu sposobnost' [Influence of cable line superposition mode on its capacity]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2016, no. 4, pp. 126-128.

4. Shcherbinin A.G., Gushchin A.V., Matematicheskoe modelirovanie protsessov teplomassopere-nosa kabel'nykh linii napriazheniem 0,4 kV [Mathematical simulation of 0,4 kV cable line heat and mass transfer processes]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2015, no. 4, pp. 154-156.

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

6. Kazakov A.V., Shcherbinin A.G., Trufanova N.M., Savchenko V.G. Raschet okhlazhdeniia kabelia v kanale s uchetom konvektivnogo teplomassoobmena i teplovogo izlucheniia [Calculations of cooling the cable in channel taken into account convection heat and mass transfer and temperature radiation]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta*, 2010, no. 4, pp. 4-11.

7. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. Teploperedacha [Heat interchange]. 3rd ed. Moscow: Energiia, 1975. 488 p.

8. Shcherbinin A.G., Cherniaev V.V. Teploperedacha [Heat interchange]. Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2014.

9. Teploprovodnost' i teplofizicheskie svoistva veshchestv i materialov [Heat conductivity and heat-transfer properties of materials], available at: <http://www.thermalinfo.ru> (accessed 19 May 2017).

10. Eremkin A.I., Koroleva T.I. Teplovoi rezhim zdaniia [Building thermal behavior]. Moscow: ACB, 2000. 368 p.

11. Zevin M.B., Trifonov A.N. Proizvodstvo i raspredelenie elektricheskoi energii [Power generation and electricity distribution]. Moscow: Vysshiaia shkola, 1984. 239 p.

Сведения об авторах

Труфанова Наталия Михайловна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой конструирования и технологии в электротехнике Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр-т, 29, e-mail: ktei@pstu.ru).

Будаян Валентин Алексеевич (Пермь, Россия) – магистрант кафедры конструирования и технологии в электротехнике Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр-т, 29, e-mail: shaoran@live.ru).

About the authors

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).

Budayan Valentin Alexeyevich (Perm, Russian Federation) is a Master Student Department of designing and technology in electrical equipment Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: shaoran@live.ru).

Получено 31.07.2017