

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2024.3.03

УДК 621.315.232

**М.А. Васильев, Н.М. Труфанова**Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Российская Федерация

## **ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В КАБЕЛЬНОМ КАНАЛЕ**

В современных кабельных системах наблюдается тенденция к увеличению плотности прокладки кабельных линий. Однако повышение плотности кабельных линий приводит к увеличению тепловыделений, которые, в свою очередь, создают риск перегрева кабелей и, как следствие, снижают надежность и безопасность работы электрооборудования. Для решения этой проблемы требуется точное прогнозирование температурного распределения внутри кабельных каналов, которое невозможно получить аналитически из-за сложности физических процессов, протекающих в них. В связи с этим становится актуальным применение численных методов для моделирования нестационарных процессов теплопереноса в кабельных каналах. Численное моделирование позволяет учесть влияние множества факторов, влияющих на температурное распределение. **Цель:** данная работа посвящена разработке и построению математической модели нестационарных процессов теплопереноса в уплотненном и неуплотненном прямоугольном кабельных каналах, проложенных под землей. **Методы:** поставленная задача решалась с помощью, численной реализации модели методом конечных объемов. Моделирование производилось при помощи специализированного математического программного обеспечения ANSYS (в таких пакетах, как ICEM CFD, MAXWELL, FLUENT). **Основные результаты:** получены поля скоростей, температур в неуплотненном и уплотненном кабельных каналах, подобраны максимальные длительно-допустимые токовые нагрузки, а также проведена оценка эффективности уплотнения. **Практическая значимость:** разработанная модель может быть использована для оптимизации конструкции кабельных каналов, обеспечивая их безопасную и надежную работу. Результаты моделирования позволяют прогнозировать температурное распределение внутри кабельного канала при различных условиях эксплуатации, что важно для предотвращения аварийных ситуаций и продления срока службы кабелей.

**Ключевые слова:** теплоперенос, математическое моделирование, кабельный канал, эффективность уплотнения, нестационарные процессы.

M.A. Vasilev, N.M. Trufanova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## NUMERICAL STUDY OF NONSTATIONARY HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES IN A CABLE CHANNEL

In modern cable systems, there is a tendency to increase the density of laying cable lines. However, an increase in the density of cable lines leads to an increase in heat generation, which, in turn, creates a risk of overheating of cables and, as a result, reduces the reliability and safety of electrical equipment. To solve this problem, an accurate prediction of the temperature distribution inside cable ducts is required, which cannot be obtained analytically due to the complexity of the physical processes occurring in them. In this regard, the application of numerical methods for modeling non-stationary heat and mass transfer processes in cable ducts becomes relevant. Numerical modeling allows us to take into account the influence of many factors affecting the temperature distribution. **Purpose:** This work is devoted to the development and modeling of a mathematical model of non-stationary heat and mass transfer processes in compacted and uncompacted rectangular cable ducts laid underground. **Methods:** The task was solved using the numerical implementation of the model by the finite volume method. The simulation was performed using specialized mathematical software ANSYS (in packages such as ICEM CFD, MAXWELL, FLUENT). **Main results:** Velocity and temperature fields were obtained in uncompacted and sealed cable ducts, the maximum long-term permissible current loads were selected, and the sealing efficiency was evaluated. **Practical significance:** The developed model can be used to optimize the design of cable channels, ensuring their safe and reliable operation. The simulation results make it possible to predict the temperature distribution inside the cable duct under various operating conditions, which is important to prevent accidents and extend the service life of cables.

**Keywords:** heat and mass transfer, mathematical modeling, cable duct, sealing efficiency, non-stationary processes.

### 1. Актуальность темы исследования

Актуальность проблемы обусловлена рядом факторов, имеющих важное значение для проектируемых систем:

1. *Повышение плотности кабельных линий.* Современные тенденции в развитии электроэнергетики направлены на повышение плотности размещения кабелей в ограниченных пространствах. Это приводит к увеличению тепловой нагрузки на кабельные каналы, повышая риск перегрева и выхода кабелей из строя.

2. *Недостаток экспериментальных данных.* Проведение полноценных экспериментальных исследований теплового состояния кабельных каналов сопряжено с трудностями и дороговизной, поэтому математическое моделирование становится важным инструментом для изучения процессов теплопереноса [1–5].

3. *Нестационарность тепловых процессов.* Тепловые процессы в кабельном канале являются нестационарными, т.е. температура кабе-

лей и окружающей среды меняется во времени, что значительно усложняет расчеты теплового состояния [6].

Таким образом, разработка математической модели нестационарных процессов тепломассопереноса в уплотненном прямоугольном кабельном канале является актуальной задачей, позволяющей: предсказывать тепловое состояние кабелей в различных условиях эксплуатации [7]; определять оптимальные параметры конструкции кабельного канала для предотвращения перегрева [8]; снижать риски аварийных ситуаций и продлевать срок службы кабельных линий [9–11]; улучшать эффективность проектирования и эксплуатации электрических систем [12–14].

На сегодняшний день проведено много исследований на тему расчета номинальных токовых нагрузок [15–17]; разработаны методики экспериментального определения номинальных токовых нагрузок [18, 19]; выполнены исследования остаточного ресурса изоляционных материалов для возможности прогнозирования срока жизни кабелей в процессе износа теплоэнергетического оборудования [20–22]. Задачам тепломассопереноса в кабельных каналах посвящено большое количество статей и исследований, однако нестационарные процессы в уплотненном кабельном канале рассмотрены не были.

## 2. Постановка задачи

Геометрические размеры неуплотненного прямоугольного кабельного канала приведены на рис. 1, уплотненного – на рис. 2. Внутри канала находится воздух. Вокруг кабельного канала – земля.

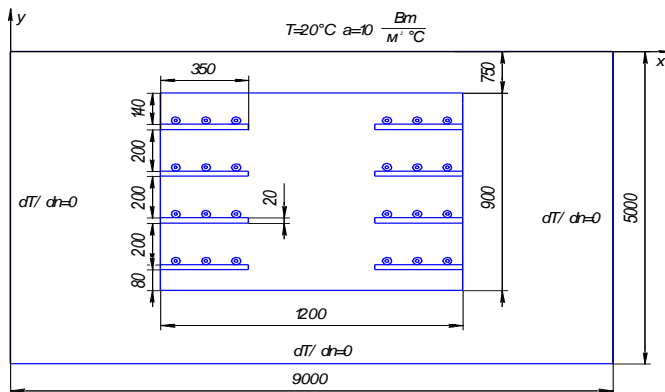


Рис. 1. Геометрические размеры и граничные условия неуплотненного кабельного канала

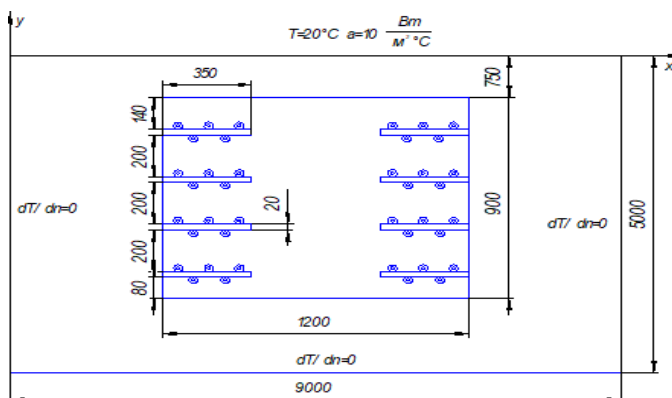


Рис. 2. Геометрические размеры и граничные условия уплотненного кабельного канала

Кабельная линия состоит из кабелей марки ПвП 1х150/35-6. Наружный диаметр составляет 30 мм, а диаметр токопроводящей жилы (далее – ТПЖ) 14 мм. Расстояние между кабелями 60 мм.

Двумерная нестационарная математическая модель движения и теплопереноса в канале создается на основе законов сохранения массы, количества движения и энергии.

Были сделаны следующие допущения: течение воздуха в канале - ламинарное, теплопроводность материалов постоянна, сложная конструкция изоляции, оболочки и других конструктивных элементов кабеля заменена однородным монолитом из сшитого полиэтилена с усредненными свойствами [23, 24], массив земли ограничен областью с заданными размерами.

С учетом сделанных допущений система дифференциальных уравнений в двумерной нестационарной постановке, описывающих процессы теплопереноса в кабельном канале, имеет следующий вид:

– уравнение движения для воздуха:

$$\rho_B \left( \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu_B \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

$$\rho_B \left( \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu_B \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} \right) + \rho_B g \beta (T - T_0); \quad (2)$$

– уравнение неразрывности для воздуха:

$$\frac{\partial \rho_B}{\partial t} + v_x \frac{\partial \rho_B}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho_B}{\partial y} = - \rho_B \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right); \quad (3)$$

– уравнение энергии для воздуха:

$$\rho_v c_v \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_v \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right); \quad (4)$$

– уравнение теплопроводности для токопроводящей жилы:

$$\lambda_{\text{ТПЖ}} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q_v = c_{\text{ТПЖ}} \rho_{\text{ТПЖ}} \frac{\partial T}{\partial t}; \quad (5)$$

– уравнение теплопроводности для твердых элементов конструкции:

$$\lambda_i \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = c_i \rho_i \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (6)$$

где  $x, y$  – декартовы координаты, (м);  $v_x, v_y$  – компоненты вектора скорости воздуха, м/с;  $t$  – время (с);  $\rho_v, \mu_v, \lambda_v, c_v$  – плотность (кг/м<sup>3</sup>), динамическая вязкость (Н·с/м<sup>2</sup>), теплопроводность (Вт/(м·°С)), теплоемкость воздуха (Дж/°С);  $T$  – температура (°С);  $T_0$  – температура, равная 20 °С;  $P$  – отклонения давления воздуха от гироскопического (Па);  $g$  – ускорение свободного падения (м/с<sup>2</sup>);  $\beta$  – температурный коэффициент плотности воздуха;  $\lambda_{\text{ТПЖ}}, c_{\text{ТПЖ}}, \rho_{\text{ТПЖ}}$  – теплопроводность (Вт/(м·°С)), теплоемкость (Дж/°С), плотность токопроводящей жилы (кг/м<sup>3</sup>);  $q_v$  – мощность внутреннего источника тепла (Вт);  $\lambda_i, c_i, \rho_i$  – теплопроводность (Вт/(м·°С)), теплоемкость (Дж/°С), плотность твердых тел (кг/м<sup>3</sup>), кроме ТПЖ [23].

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

$$q_v = q_{\text{ТПЖ}} + q_{\text{экр}}, \quad (7)$$

$$q_{\text{ТПЖ}} = \iint_{S_{\text{ТПЖ}}} \frac{I_{\text{ТПЖ}}^2}{\sigma_{\text{ТПЖ}}} dS, \quad (8)$$

$$q_{\text{экр}} = \iint_{S_{\text{экр}}} \frac{I_{\text{экр}}^2}{\sigma_{\text{экр}}} dS, \quad (9)$$

где  $I_{\text{ТПЖ}}, I_{\text{экр}}$  – номинальные токи жилы и металлического экрана (А);  $\sigma_{\text{ТПЖ}}, \sigma_{\text{экр}}$  – коэффициенты удельной электропроводности ТПЖ и металлического экрана (Ом/м);  $S_{\text{ТПЖ}}, S_{\text{экр}}$  – площадь сечения ТПЖ и металлического экрана (мм<sup>2</sup>) [25, 26].

Математическая модель электродинамических процессов в кабельных линиях основывается на уравнениях Максвелла.

Система уравнений (1)–(9) замыкалась следующими граничными условиями (10)–(15):

– на поверхности земли – граничное условие конвективного теплообмена:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_{\text{ср}}), \quad (10)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности земли, равен  $5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $T_{\text{ср}}$  – температура окружающей среды (;

– на других границах массива земли задаются адиабатические условия теплообмена:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad (11)$$

– на твердых контактах разнородных сред задаются условия 4-го рода и равенство температур:

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial n} = \lambda_j \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (12)$$

$$T_i = T_j, \quad (13)$$

где  $i$  и  $j$  – конструктивные элементы кабельного блока и грунт,  $i \neq j$ ;

– с учетом излучения на поверхности силового кабеля задается граничное условие радиационного теплообмена:

$$\lambda_{\text{к}} \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda_{\text{в}} \frac{\partial T}{\partial x} + E_{\text{изл}}, \quad (14)$$

$$T_{\text{к}} = T_{\text{в}}, \quad (15)$$

где  $\lambda_{\text{к}}$  – теплопроводность внешней оболочки кабеля ( $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ );  $E_{\text{изл}}$  – плотность потока излучения ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ );  $T_{\text{к}}$  и  $T_{\text{в}}$  – температуры поверхности кабеля и воздуха соответственно ( $^\circ\text{C}$ ).

Решение системы дифференциальных уравнений (1)–(9), замкнутой граничными условиями, осуществлялось численно, методом конечных объемов в среде математических пакетов ANSYS [6].

### 3. Результаты вычислений

Анализ сходимости численного решения позволил определить необходимое количество элементов и количество итераций (рис. 3, 4).

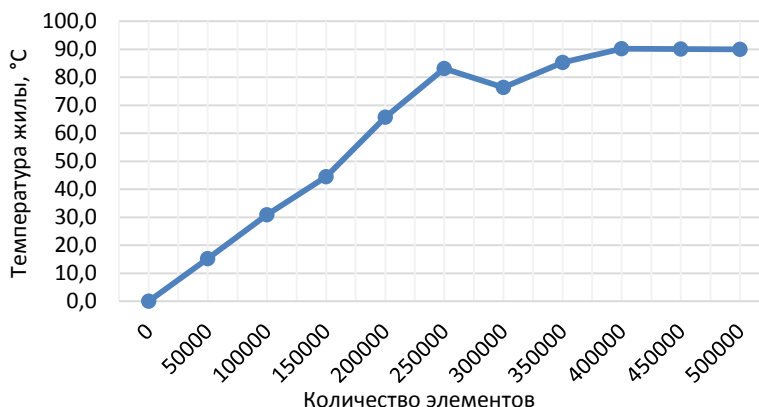


Рис. 3. График зависимости температуры на поверхности жилы от количества элементов

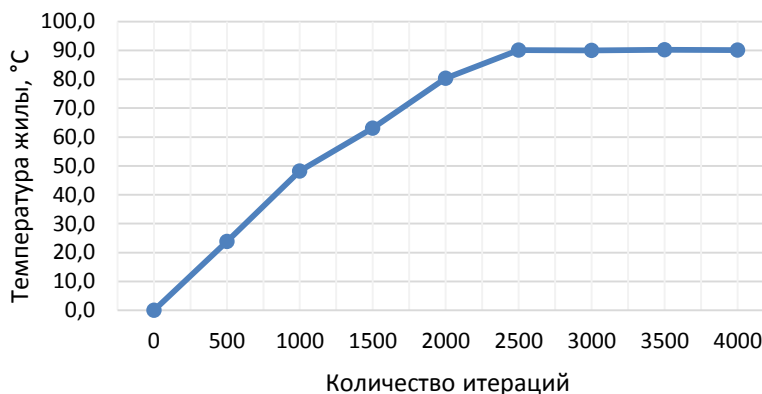


Рис. 4. График зависимости температуры на поверхности жилы от количества итераций

Как видно из графиков, необходимое количество элементов равно 400 000, а количество итераций при этом составит 2500.

### Сравнение результатов уплотненного и неуплотненного канала

Условия:

- 1) токовая нагрузка 450 А;
- 2) грунт – растительная почва;
- 3) материал жил – медь.

Получено распределение температурного поля для неуплотненного канала при токовой нагрузке в 450 А (рис. 5).

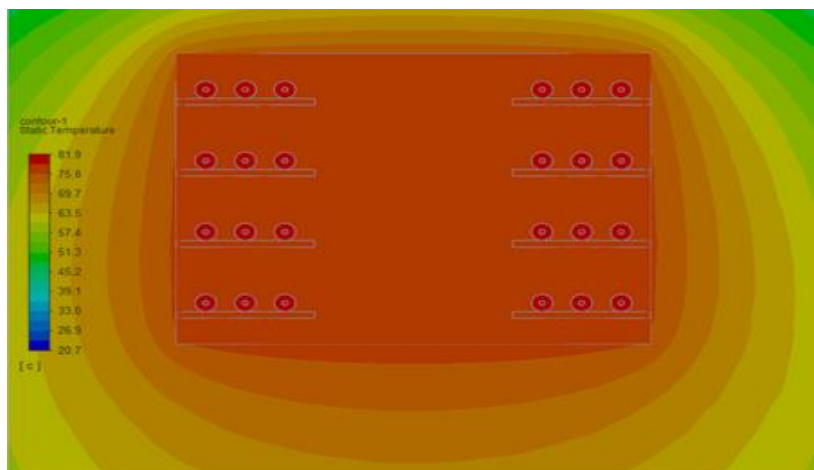


Рис. 5. Установившаяся температура в кабельном канале при нагрузке в 450 А (составила 81,9 °С)

Для достижения максимальной длительно-допустимой температуры по изоляции (90 °С для сшитого полиэтилена (далее – СПЭ)) в неуплотненном кабельном канале подобрана токовая нагрузка, составившая 494 А (рис. 6).

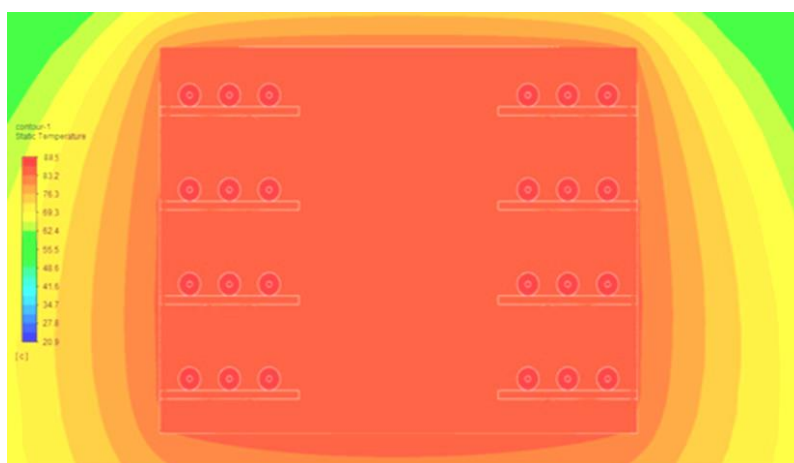


Рис. 6. Установившаяся температура в кабельном канале при нагрузке в 494 А (составила 89,5 °С)

Для достижения максимальной длительно-допустимой температуры по изоляции (90 °С для СПЭ) в уплотненном кабельном канале подобрана токовая нагрузка, составившая 449 А (рис. 7).



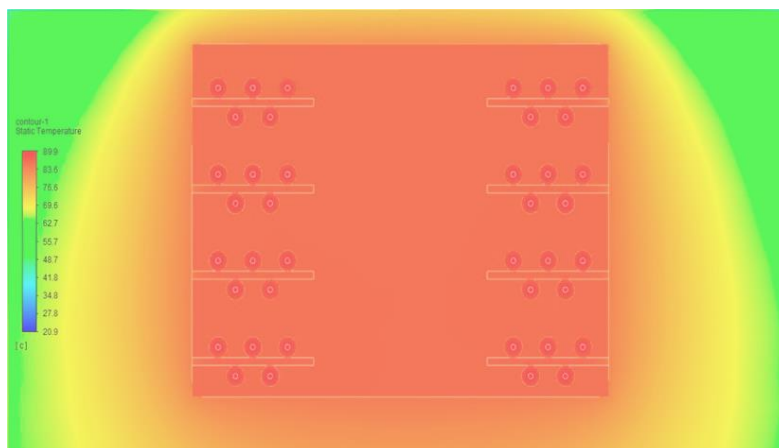


Рис. 7. Установившаяся температура в кабельном канале при нагрузке в 449 А (составила 89,9 °С)

### Заключение

В данной работе была рассмотрена задача тепломассопереноса в кабельном канале заданной геометрической конструкции и выбран метод решения этой задачи – метод конечных объемов. С учетом граничных условий и сделанных допущений были выведены дифференциальные уравнения в двухмерной нестационарной постановке, описывающие процессы тепломассопереноса в кабельном канале такие как: уравнение движения, уравнение неразрывности, уравнение энергии для воздуха, уравнение теплопроводности для кабельной линии, уравнение теплопроводности для массива земли.

Были получены результаты распределения температур в зависимости от наличия уплотнения кабельного канала. Произведено сравнение результатов, полученных в уплотненном кабельном канале, с результатами, полученными в неуплотненном кабельном канале.

Показано, что при уплотнении кабельного канала температуры увеличились на 11 %, при этом, чтобы вернуть температуры в допустимые пределы, пришлось снизить токовую нагрузку на 45 А на каждой кабельной линии. Но так как количество кабелей увеличилось с 24 до 40 шт., можно говорить об увеличении эффективности кабельного канала примерно на 34 %.

Практическая ценность разработанной модели заключается в возможности ее использования для оптимизации конструкции кабельных

каналов, обеспечивая их безопасную и надежную работу, а также результаты моделирования позволят предсказывать тепловой режим канала при различных условиях эксплуатации, что важно для предотвращения аварийных ситуаций и продления срока службы кабелей.

Дальнейшие исследования могут быть направлены как на учет более сложных конструкций кабельных каналов, так и на создание интеллектуальных систем управления температурным режимом кабельных линий.

### **Библиографический список**

1. Singh, K. Cable monitoring solution – predict with certainty / K. Singh, D. Watley // Second Seminar on Undergrounding of Electric Distribution Networks (Cabos'11). – Maceió. Alagoas, 2011.

2. Shwehdi, M.H. Investigating and Studying the Thermal Effect of the Underground Cables / M.H. Shwehdi, F.S. AL-Ismail, A.A. AL-Nuaim // 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. – June 2010. DOI: 10.1109/ELINSL.2010.5549813

3. Terracciano, M. Thermal analysis of cables in unfilled troughs: investigation of the IEC standard and a methodical approach for cable rating / M. Terracciano, S. Purushothaman // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2012. – Vol. 27 (3). – P. 1423–1431.

4. Thermal transient analysis of underground cables / J. Desmet [et al.] // 7th International Conference on Insulated Power Cables (JiCable'07). – Paris, 2007.

5. Real time monitoring of power cables by fibre optic technologies. Tests, applications and outlook / G.J. Anders [et al.] // 6th International Conference on Insulated Power Cables (JiCable'03). – Paris, 2003.

6. Гуревич, Ю.Е. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя / Ю.Е. Гуревич, К.В. Кабиков. – М.: Элекс-КМ, 2005.

7. Singh, K. Cable monitoring solution – predict with certainty / K. Singh, D. Watley // Second Seminar on Undergrounding of Electric Distribution Networks (Cabos'11). – Maceió. Alagoas, 2011.

8. Ukil, A. Distributed temperature sensing review of technology and applications / A. Ukil, H. Braendle, P. Krippner // Sensors Journal, IEEE. – 2012. – Vol. 12 (5). – P. 885–892.

9. Working Group 02, CIGRE Study Committee 21: Current ratings of cables for cyclic and emergency loads. Part 1. Cyclic ratings (Load Factor less than 100%) and response to a step function // *Electra*. – 1972. – № 24. – P. 63–96.

10. Working Group 21-03, CIGRE Study Committee 21: Current ratings of cables for cyclic and emergency loads. Part 2. Emergency ratings and short duration response to a step function // *Electra*. – 1976. – № 44. – P. 95–108.

11. Кучеров, Ю.Н. Проблемы обеспечения безопасности потребителей и объектов электроэнергетики при нарушениях работы энергосистемы / Ю.Н. Кучеров, Ю.Е. Гуревич // *Энергетик*. – 2007. – № 8. – С. 8–12.

12. Титков, В.В. Кабельные линии 6–10 кВ и выше. Влияние способов прокладки на температурный режим / В.В. Титков, С.М. Дудкин // *Новости электротехники*. – 2012. – № 3.

13. Optimal position of buried power cables / G. De Mey [et al.] // *Elektronika ir Elektrotechnika*. – 2014. – Vol. 20 (5). DOI: 10.5755/j01.eee.20.5.7097

14. Research on optimal placement methodology of power cable in ductbank / J. Wang [et al.] // *Energy Reports*. – 2023. – Vol. 9. – P. 46–57. DOI: 10.1016/j.egy.2022.10.363

15. Грешняков, Г.В. К вопросу о выборе предельно допустимых токов силовых кабелей / Г.В. Грешняков, Г.В. Ковалев, С.Д. Дубницкий // *Кабели и провода*. – 2011. – № 6. – С. 12–16.

16. Calculation of ampacity of underground cables under humidity migration conditions / Meng Gao [et al.] // 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). – July 2015. DOI: 10.1109/ICPADM.2015.7295442

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

18. Ким, В.С. Методика экспериментального определения номинальных токовых нагрузок кабельных изделий / В.С. Ким, В.А. Лавринович, О.А. Анисимова // *Науковедение: интернет-журнал*. – 2013. – № 3 (16). – С. 75.

19. Neher, J.H. Calculation of the temperature rise and load capability of cable systems / J.H. Neher, M.H. McGrath // AIEE Transactions. – 1957. – Vol. 76. – Part 3. – P. 755–772.

20. Бирюлин, В.И. Расчет температуры нагрева изоляции кабеля с учетом влияния рядом проложенных кабелей / В.И. Бирюлин, Д.В. Куделина, А.Н. Горлов // Вестник КГЭУ. – 2019. – № 2 (42). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-temperatury-nagreva-izolyatsii-kabelya-s-uchetom-vliyaniya-ryadom-prolozhennyh-kabeley> (дата обращения: 10.06.2024).

21. Dubyago, M.N. Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration / M.N. Dubyago, N.K. Poluyanovich // AEECE 2015: International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering. Changsha: Atlantis Press. – 2015. – P. 49–54.

22. Николаева, О.В. Точность схем метода конечных элементов для решения уравнения переноса на неструктурированных тетраэдрических и призматических сетках / О.В. Николаева, А.С. Казанцева // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2020. – № 1. – С. 3–19.

23. Труфанова, Н.М. Математическое моделирование нестационарных процессов теплопереноса в прямоугольном кабельном канале / Н.М. Труфанова, М.А. Васильев // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы всерос. науч.-техн. конф.: в 2 т. – Пермь, 2022. – С. 25–31.

24. Усович, О.И. Выбор рационального режима работы кабельных линий при уплотнении кабельного канала / О.И. Усович, Н.М. Труфанова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 4. – С. 133–135.

25. Зыков, А.С. Численная оценка температурного поля муфтового кабельного соединения и его влияния на пропускную способность кабельной линии / А.С. Зыков, Н.М. Труфанова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2018. – № 28. – С. 7–17.

26. Труфанова, Н.М. Математическое моделирование нестационарных процессов теплопереноса в прямоугольном кабельном

канале / Н.М. Труфанова, Е.Ю. Навалихина, М.В. Марковский // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 3 (11). – С. 55–66.

### References

1. Singh K., Watley D. Cable monitoring solution - predict with certainty. *Second Seminar on Undergrounding of Electric Distribution Networks (Cabos'11)*. Maceió. Alagoas, 2011.

2. Shwehdi, M.H., AL-Ismail F.S., AL-Nuaim A.A. Investigating and Studying the Thermal Effect of the Underground Cables. *2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, June 2010. DOI: 10.1109/ELINSL.2010.5549813

3. Terracciano M., Purushothaman S. Thermal analysis of cables in unfilled troughs: investigation of the IEC standard and a methodical approach for cable rating. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2012, vol. 27 (3), pp. 1423-1431.

4. Desmet J. et al. Thermal transient analysis of underground cables. *7th International Conference on Insulated Power Cables (JiCable'07)*. Paris, 2007.

5. Anders G.J. et al. Real time monitoring of power cables by fibre optic technologies. Tests, applications and outlook. *6th International Conference on Insulated Power Cables (JiCable'03)*. Paris, 2003.

6. Gurevich Iu.E., Kabikov K.V. Osobennosti elektrosnabzheniia, orientirovannogo na bespereboinuiu rabotu promyshlennogo potrebitelia [Features of power supply aimed at uninterrupted operation of industrial consumers]. Moscow: Eleks-KM, 2005.

7. Singh K., Watley D. Cable monitoring solution - predict with certainty. *Second Seminar on Undergrounding of Electric Distribution Networks (Cabos'11)*. Maceió. Alagoas, 2011.

8. Ukil A., Braendle H., Krippner P. Distributed temperature sensing review of technology and applications. *Sensors Journal, IEEE*, 2012, vol. 12 (5), pp. 885-892.

9. Working Group 02, CIGRE Study Committee 21: Current ratings of cables for cyclic and emergency loads. Part 1. Cyclic ratings (Load Factor less than 100%) and response to a step function. *Electra*, 1972, no. 24, pp. 63-96.

10. Working Group 21-03, CIGRE Study Committee 21: Current ratings of cables for cyclic and emergency loads. Part 2. Emergency ratings and short duration response to a step function. *Electra*, 1976, no. 44, pp. 95-108.

11. Kucherov Iu.N., Gurevich Iu.E. Problemy obespecheniia bezopasnosti potrebiteli i ob"ektov elektroenergetiki pri narusheniakh raboty energosistemy [Problems of ensuring the safety of consumers and electric power facilities during power system failures]. *Energetik*, 2007, no. 8, pp. 8-12.

12. Titkov V.V., Dudkin S.M. Kabel'nye linii 6-10 kV i vyshe. Vliianie sposobov prokladki na temperaturnyi rezhim [Cable lines 6-10 kV and higher. The influence of laying methods on the temperature regime]. *Novosti elektrotehniki*, 2012, no. 3.

13. De Mey G. et al. Optimal position of buried power cables. *Elektronika ir Elektrotehnika*, 2014, vol. 20 (5). DOI: 10.5755/j01.eee.20.5.7097

14. Wang J. et al. Research on optimal placement methodology of power cable in ductbank. *Energy Reports*, 2023, vol. 9, pp. 46-57. DOI: 10.1016/j.egy.2022.10.363

15. Greshniakov G.V., Kovalev G.V., Dubnitskii S.D. K voprosu o vybore predel'no dopustimykh tokov silovykh kabelei [On the issue of selecting maximum permissible currents of power cables]. *Kabeli i provoda*, 2011, no. 6, pp. 12-16.

16. Gao Meng et al. Calculation of ampacity of underground cables under humidity migration conditions. *2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*. July 2015. DOI: 10.1109/ICPADM.2015.7295442

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

18. Kim V.S., Lavrinovich V.A., Anisimova O.A. Metodika eksperimental'nogo opredeleniia nominal'nykh tokovykh nagruzok kabel'nykh izdelii [Methodology for experimental determination of nominal current loads of cable products]. *Naukovedenie: internet-zhurnal*, 2013, no. 3 (16), 75 p.

19. Neher J.H., McGrath M.H. Calculation of the temperature rise and load capability of cable systems. *AIEE Transactions*, 1957, vol. 76, part 3, pp. 755-772.

20. Biriulin V.I., Kudelina D.V., Gorlov A.N. Raschet temperatury nagreva izoliatsii kabelia s uchetom vliianiia riadom prolozhennykh kabelei [Calculation of the heating temperature of the cable insulation taking into account the influence of nearby cables]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2019, no. 2 (42), available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschet-temperatury-nagreva-izolyatsii-kabelya-s-uchetom-vliyaniya-ryadom-prolozhennykh-kabeley> (accessed 10 June 2024).

21. Dubyago M.N., Poluyanovich N.K. Prediction of residual life of isolating materials in the process of thermal power equipment deterioration. *AEECE 2015: International Conference on Advances in Energy, Environment and Chemical Engineering*. Changsha: Atlantis Press, 2015, pp. 49-54.

22. Nikolaeva O.V., Kazantseva A.S. Tochnost' skhem metoda konechnykh elementov dlia resheniia uravneniia perenosa na nestrukturirovannykh tetraedricheskikh i prizmaticheskikh setkakh [Accuracy of finite element method schemes for solving the transport equation on unstructured tetrahedral and prismatic meshes]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov*, 2020, no. 1, pp. 3-19.

23. Trufanova N.M., Vasil'ev M.A. Matematicheskoe modelirovanie nestatsionarnykh protsessov teplomassoperenosa v priamougol'nom kabel'nom kanale [Mathematical modeling of non-stationary heat and mass transfer processes in a rectangular cable channel]. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii. Materialy vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. Perm', 2022, pp. 25-31.

24. Usovich O.I., Trufanova N.M. Vybor ratsional'nogo rezhima raboty kabel'nykh linii pri uplotnenii kabel'nogo kanala [Selecting a rational mode of operation of cable lines when compacting a cable channel]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ia*, 2015, no. 4, pp. 133-135.

25. Zykov A.S., Trufanova N.M. Chislennaia otsenka temperaturnogo polia muftovogo kabel'nogo soedineniia i ego vliianiia na propusknuuiu sposobnost' kabel'noi linii [Numerical assessment of the temperature field of a sleeve cable joint and its influence on the throughput of a cable line]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia* я, 2018, no. 28, pp. 7-17.

26. Trufanova N.M., Navalikhina E.Iu., Markovskii M.V. Matematicheskoe modelirovanie nestatsionarnykh protsessov teplomassopere-nosa v priamougol'nom kabel'nom kanale [Mathematical modeling of non-stationary heat and mass transfer processes in a rectangular cable channel]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnikha, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2014, no. 3 (11), pp. 55-66.

### Сведения об авторах

**Васильев Максим Андреевич** (Пермь, Российская Федерация) – магистрант кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: vasilev.maks2000@mail.ru).

**Труфанова Наталия Михайловна** (Пермь, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: trufanova@pstu.ru).

### About the authors

**Maksim A. Vasilev** (Perm, Russian Federation) – Master's student of the Department of Design and Technology in Electrical Engineering of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: vasilev.maks2000@mail.ru).

**Natalia M. Trufanova** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Design and Technology in Electrical Engineering at Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: trufanova@pstu.ru).

Поступила: 20.07.2024. Одобрена: 29.07.2024. Принята к публикации: 01.10.2024.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

**Вклад авторов.** Авторы сделали равноценный вклад в подготовку статьи.



Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:  
Васильев, М.А. Численное исследование нестационарных процессов тепломассопереноса в кабельном канале / М.А. Васильев, Н.М. Труфанова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2024. – № 51. – С. 40–56. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.3.03

Please cite this article in English as:

Vasilev M.A., Trufanova N.M. Numerical study of nonstationary heat and mass transfer processes in a cable channel. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2024, no. 51, pp. 40-56. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.3.03