

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА В КАБЕЛЬНЫХ МУФТАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕДНО-ГРАФЕНОВОЙ ЗАЩИТЫ

Ошхунов М.М., Энес А.З.

Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик

Ключевые слова: температурное поле, метод конечных элементов, математическая модель, кабельные муфты, кабельные линии, медно-графеновый композит.

Аннотация. В статье предлагается математическая модель и численный анализ методом конечных элементов температурного поля в кабелях с полиэтиленовой изоляцией и соединительными муфтами, проложенными в грунте. Разбиение на конечно-элементную сетку и расчеты тепловых потоков проводились с использованием программного комплекса "COMSOL". Разработанная модель позволяет анализировать токовые нагрузки в кабельных линиях с муфтовым соединением и предсказывать температурные режимы в процессе эксплуатации. На основе результатов численного анализа модели разработаны методы снижения температуры в местах соединений. Для улучшения теплоотвода предлагается оптимизация конструкции кабельной муфты с использованием медно-графенового композита. В результате численного анализа выявлено, что применение медно-графеновых композитов способствует уменьшению температуры в кабельной системе и предотвращению перегревов за счет высокой теплопроводности материала. Таким образом, использование таких композитов в кабельных муфтах способствует повышению долговечности и обеспечивает более надежную работу кабельных систем.

TEMPERATURE FIELD MODELING AND NUMERICAL ANALYSIS OF HEAT PROPAGATION IN CABLE JOINTS USING COPPER-GRAPHENE PROTECTION

Oshkhunov M.M., Enes A.Z.

Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik

Keywords: temperature field, finite element method, mathematical model, cable couplings, cable lines, copper-graphene composite.

Abstract. The article proposes a mathematical model and numerical analysis using the finite element method of the temperature field in cables with polyethylene insulation and couplings laid in the ground. Partitioning into a finite element mesh and heat flow calculations were carried out using the COMSOL software package. The developed model makes it possible to analyze current loads in cable lines with a coupling connection and predict temperature conditions during operation. Based on the results of numerical analysis of the model, methods have been developed to reduce the temperature at the joints. To improve heat dissipation, optimization of the cable coupling design using a copper-graphene composite is proposed. As a result of numerical analysis, it was revealed that the use of copper-graphene composites helps to reduce the temperature in the cable system and prevent overheating due to the high thermal conductivity of the material. Thus, the use of such composites in cable joints improves durability and ensures more reliable operation of cable systems.

Введение

В процессе эксплуатации кабельных муфт ключевым фактором является тепловой режим, который зависит от различных параметров, включая геометрию кабельного канала, условия прокладки кабельных линий, физические свойства материалов, условия теплообмена и воздействие индуцированных токов.

Математическое моделирование и численные эксперименты играют важную роль в научных исследованиях за счет возможности оптимизации процессов, снижения финансовых затрат на физические тесты и повышения надежности кабельных муфт. В рамках настоящего исследования были разработаны математические модели, направленные на анализ температурных полей при укладке кабельных линий в земле соединенных кабельными муфтами. Данные модели позволяют оценить тепловые процессы в структурах кабелей и улучшить процессы проектирования и эксплуатации кабельных сетей, повышая их эффективность и надежность.

Для улучшения теплоотвода предлагается оптимизация конструкции кабельной муфты с использованием медно-графенового композита. Результаты численного анализа свидетельствуют о том, что применение данного композитного материала способствует снижению температуры в кабельной системе и предотвращению перегрева благодаря высокой теплопроводности материала. Таким образом, интеграция медно-графеновых композитов в кабельные муфты способствует увеличению долговечности системы и обеспечивает более надежную работу кабельных сетей.

Постановка задачи

Многие задачи расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) связаны с необходимостью решения уравнения теплопроводности для получения распределения температуры в исследуемом объекте.

Процессы теплопереноса в кабельной линии, описываются уравнениями теплопроводности вида [1-5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left[k_{каб} \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_{каб} \frac{\partial T}{\partial y} \right] = -q - cp \frac{\partial T}{\partial t} - \text{для жилы кабеля,} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[k_{изол} \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_{изол} \frac{\partial T}{\partial y} \right] = 0 - \text{для кабельной изоляции,} \\ \frac{\partial}{\partial x} \left[k_{грунт} \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_{грунт} \frac{\partial T}{\partial y} \right] = 0 - \text{для грунта.} \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $T = T(x, y, t)$ – температура в точке с координатами x, y в момент времени t , $q = q(x, y, t)$ – мощность источника тепла; c – удельная теплоемкость (Дж/(кг·К)), p – плотность среды (кг/м³), k – коэффициент теплопроводности для расчетных областей, указанных в уравнении (1).

Для решения системы уравнений (1) необходимо задать граничные и начальные условия:

$$\begin{cases} k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=W} = 0, \\ k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \\ k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{y=0} = 0, \\ k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{y=H} = a(T(y) - T_{окр}). \end{cases} \quad (2)$$

В выражениях (2) $T_{окр}$ – температура окружающей среды; W, H обозначают ширину и высоту домена, а начальные условия принимаются нулевыми.

Уравнения (1) с граничными и начальными условиями (2) решаются при следующих значениях параметров: температура окружающей среды $T_{окр} = 20^\circ\text{C}$, ток в кабельной сети $I = 550\text{A}$.

Материалы и методы

В исследуемой модели использовались геометрические размеры и характеристики материала силового кабеля марки СБГ 1х240 и соединительной муфты 1ПСТ-10-240 [6, 7]. В таблицах 1 и 2 представлены физико-механические и геометрические свойства указанных материалов [8-10].

Был проведен анализ температурного поля на базе математической модели (1), (2) для двух кабелей, проложенных рядом друг с другом в земляном массиве. Окружающая среда представляет собой прямоугольный массив с длиной 10 метров и высотой 15 метров при толщине 3 метра. Глубина прокладки кабелей, т.е. расстояние от оси кабеля до верхней поверхности окружающего грунта принимается равной 3 м.

Для решения этой задачи применяется конечно-элементное разбиение объекта в виде сетки, как показано на рисунке 1.

Табл. 1. Геометрические свойства материалов

Параметры		Единицы измерения	Значение
Медная жилы	Сечение	мм ²	240
Изоляция жилы из ПВХ пластиката	Толщина	см	0,4
Алюминиевый наконечник муфты		см	0,4
Защитный шланг из ПВХ		см	0,75

Табл. 2. Физико-механические свойства

Элемент	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость c , Дж/(кг·К)	Плотность ρ , кг/м ³
Медная жила	387,6	381	8978
Алюминиевый наконечник муфты	236	903	2710
Изоляция из оболочки ПВХ	0,43	0,34	950
Грунт	0,5	2100	2000

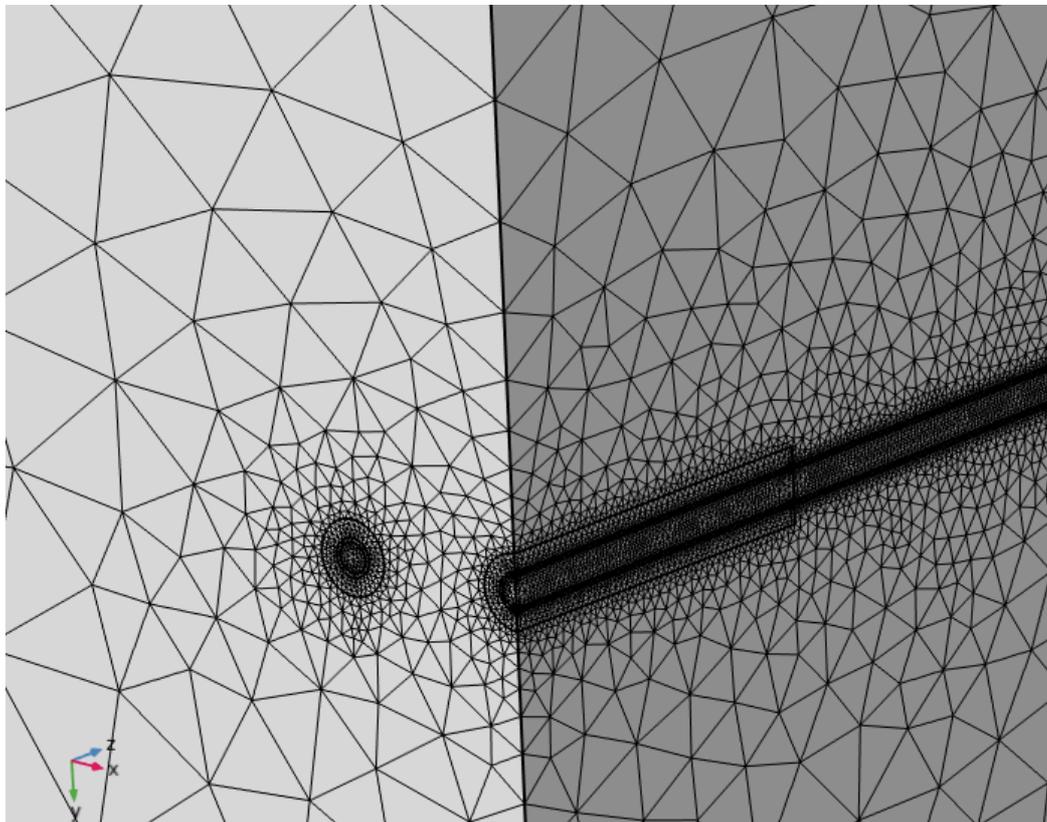


Рис.1. Конечно-элементная сетка разбиения кабельных муфт в разрезе и по длине

Результат моделирование температурных нагрузок в кабельной муфте проложенной в грунте

На рисунках 2, 3 представлено распределение температуры в двух кабельных муфтах. Расчет температурного поля на базе модели (1), (2) проводился с использованием программного комплекса COMSOL. Допустимая рабочая температура и сила тока для кабеля данной марки составляет 80 градусов и 600 ампер соответственно. По данным рисунков 2 и 3 можно сделать вывод, что максимальная температура в области муфты составляет 90,9 градусов в первом кабеле, а во втором 94,8 градуса. Это означает, что обе муфты находятся в состоянии перегрева, что может привести к возможной потере их работоспособности.

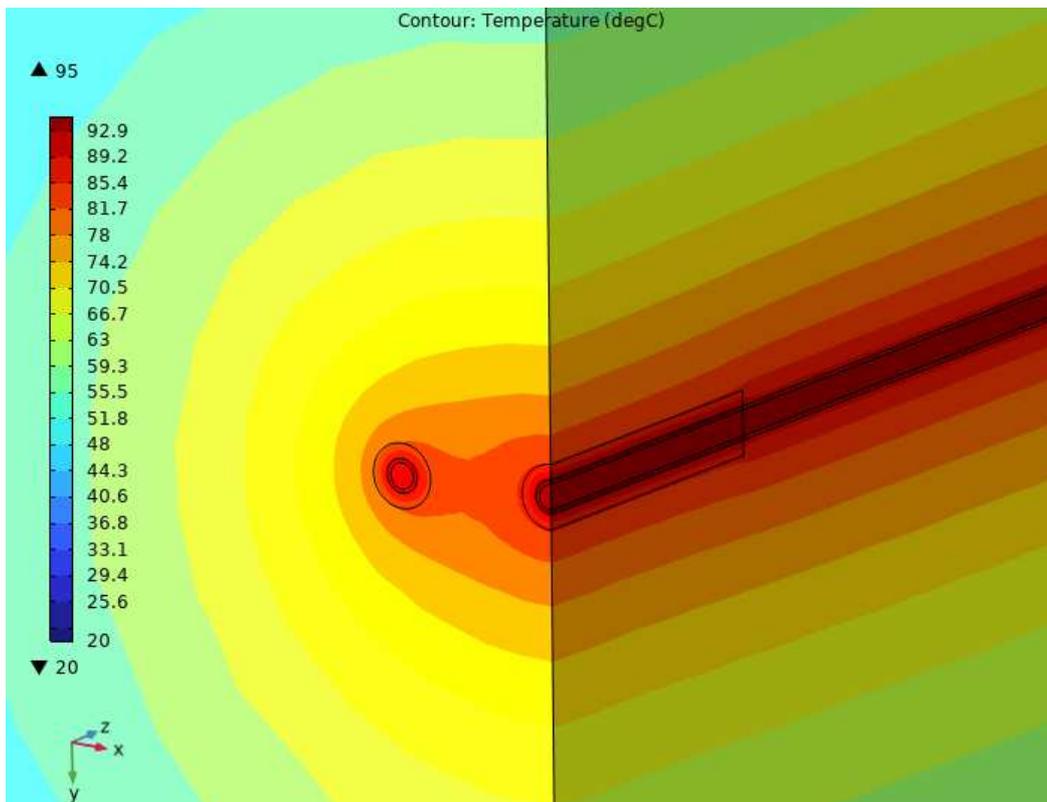


Рис. 2. Пространственная картина распределения температуры в кабельных муфтах, проложенных в земляном массиве; максимальная температура достигается внутри токопроводящей жилы

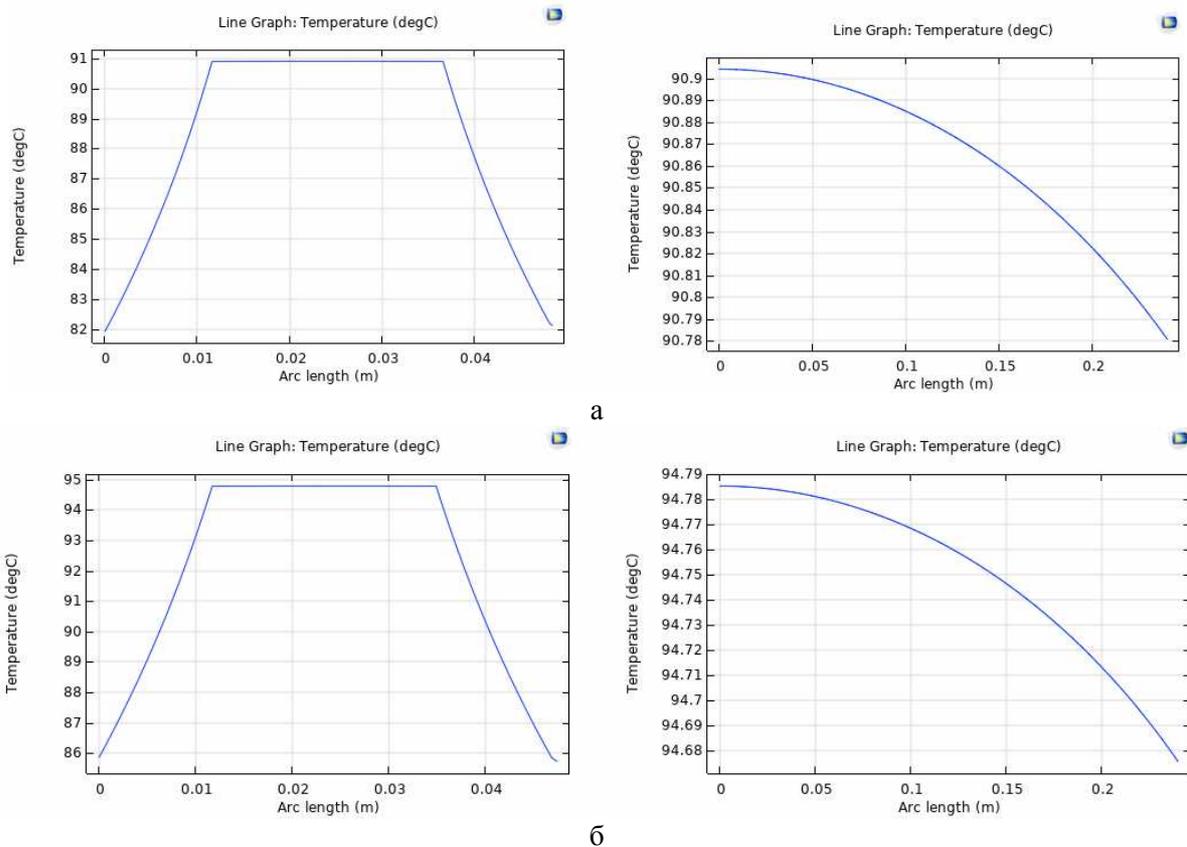


Рис. 3. Графики распределения температуры в поперечном и продольном сечении кабельных муфт, проложенных в земляном массиве: а) левая муфта; б) правая муфта

Из полученных численных результатов следует что, в такой ситуации необходимы конструктивные решения с целью обеспечения более эффективного отвода тепла.

Оптимизация конструкции кабельных муфт для уменьшения температурной нагрузки

В системах распределения электроэнергии, предпочтительными являются материалы с низким или стабильным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС). Это связано с тем, что электрические системы часто работают в широком диапазоне температур и изменения сопротивления могут привести к потерям энергии, снижению эффективности и перегреву компонентов. Развитие новых материалов и технологий позволяет повысить эффективность и надежность энергетических систем. Примером таких материалов является медно-графеновые композиты.

Графен имеет низкий температурный коэффициент сопротивления по сравнению с чистой медью. Это значит, что данный материал при высоких температурах более стабилен с точки зрения ТКС. По этой причине предлагается использование дополнительных слоев графена в кабельные муфты, что будет способствовать более эффективному отводу тепла. Кроме того, для усиления эффекта теплоотвода кабельные муфты размещаются в кабельных каналах, изготовленных из того же материала. Физико-механические свойства медно-графенового композита и геометрические свойства дополнительных слоев представлены в таблицах 3 и 4 [11-14].

Табл. 3. Геометрические свойства дополнительных слоев из медно-графенового композита

Параметры		Единицы измерения	Значение
Внутренний слой	Толщина	см	0,64
Внешний слой		см	1
Кабельный канал		см	16

Табл. 4. Физико-механические свойства медно-графенового композита

Элемент	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость с, Дж/(кг·К)	Плотность ρ , кг/м ³
Графеновые слои	387,6	700	2270

Для решения задачи теплопроводности для кабеля с дополнительными слоями из графена использовалась сетка конечных элементов, показанная на рисунке 4. Минимизация функционала полной энергии для которого уравнения теплопроводности (1) с граничными условиями (2) являются уравнениями типа Эйлера-Лагранжа осуществлялась по алгоритмам изложенным в работе [15].

Результаты анализа методом конечных элементов температурного поля, представлены на рисунках 5, 6. Из графиков на рисунке 6 видно что значения максимальной температуры в обеих муфтах практически одинаковы и составляют 80 градусов для первого кабеля и 81 градус для второго. Очевидно, что использования дополнительных слоев из медно-графенового кабельного канала демонстрируют преимущества, т.к. как они приводят к снижению температуры в муфтах на 14,7 градусов. Расчеты также показывают, что дополнительные слои графена обладают высокой теплопроводностью, способствующей улучшению отвода тепла.

Для повышения эффективности противодействия перегреву кабельные муфты с дополнительными слоями из медно-графенового композита были помещены в конструкции с разделительной перегородкой из того же материала. На рисунках 7 и 8 представлены результаты численного анализа из которых видно что максимальная температура в обеих муфтах идентична и равна 73,6 градусов, температура по сравнению с предыдущим значением уменьшилась еще на 7.4 градуса. Таким образом, данное дополнение в кабельную конструкцию способствует более эффективному отводу тепла и повышению общей надежности системы.

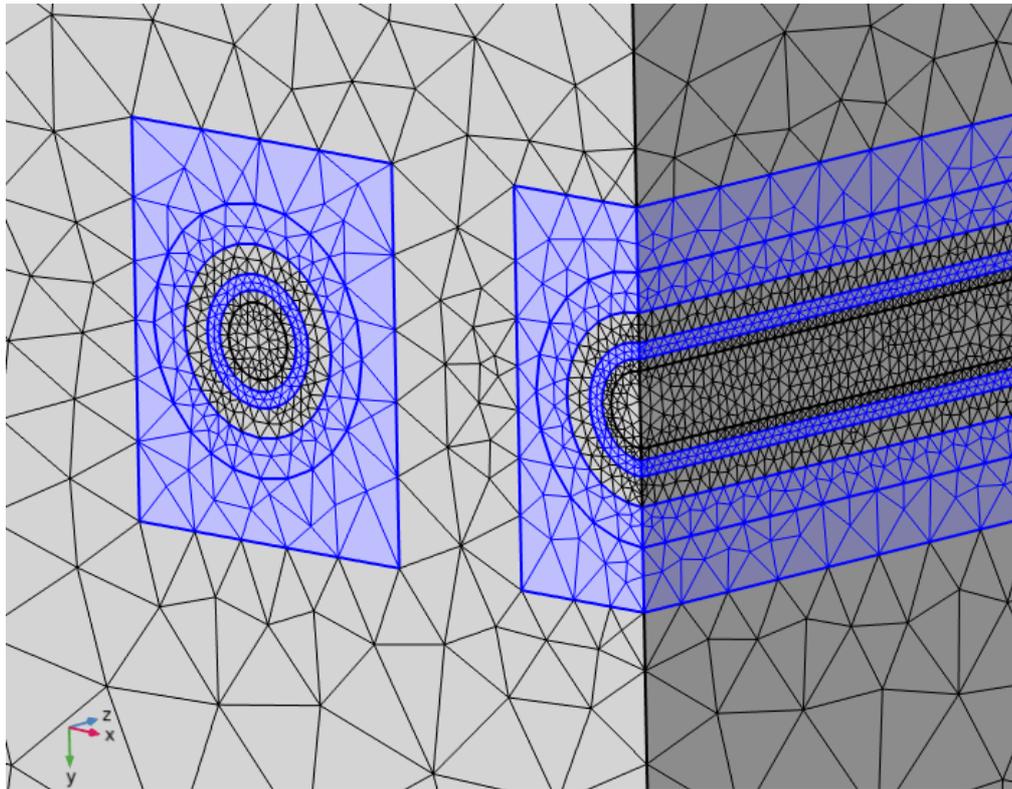


Рис. 4. Конечно-элементная сетка разбиения кабельных муфт с дополнительными слоями из медно-графенового композита; сгущение сетки в окрестности кабеля с изоляцией обусловлено быстрым изменением температурного поля

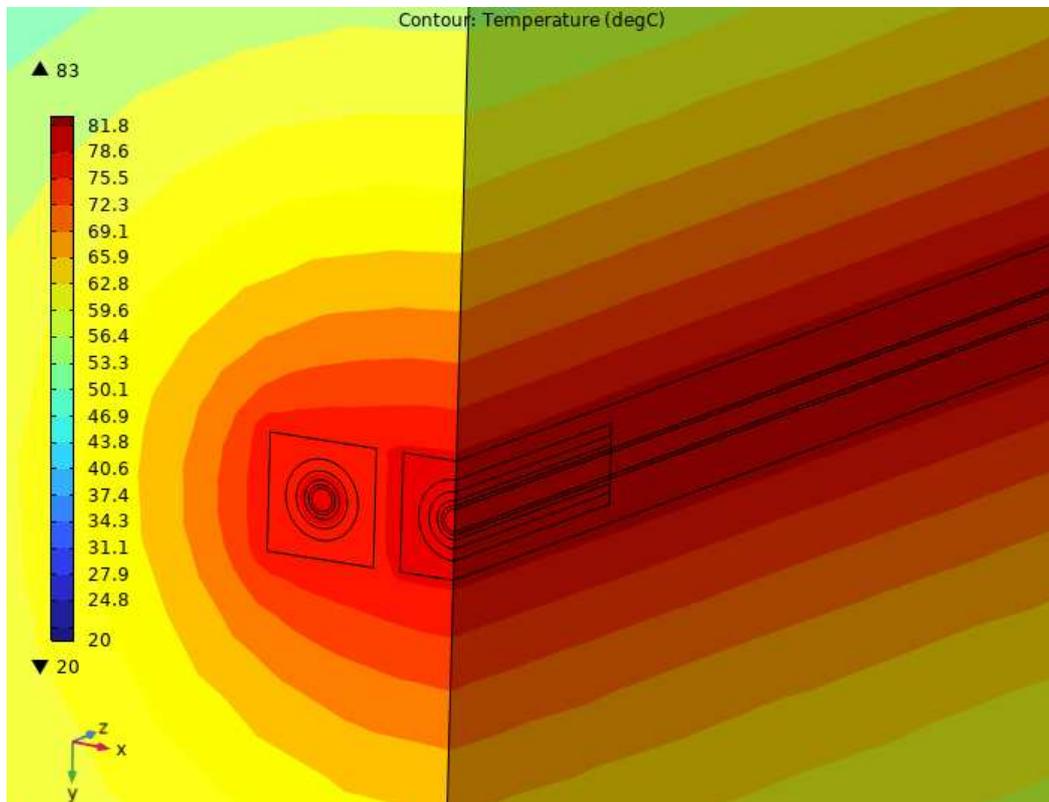
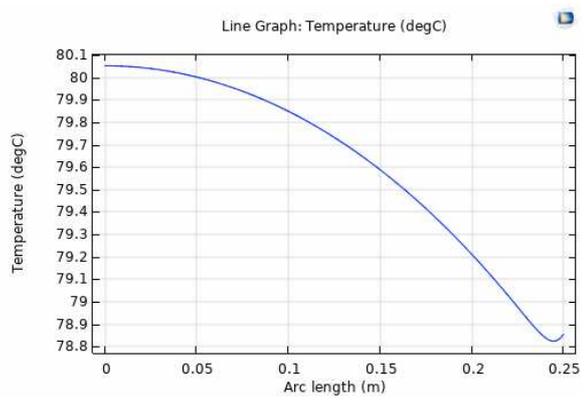
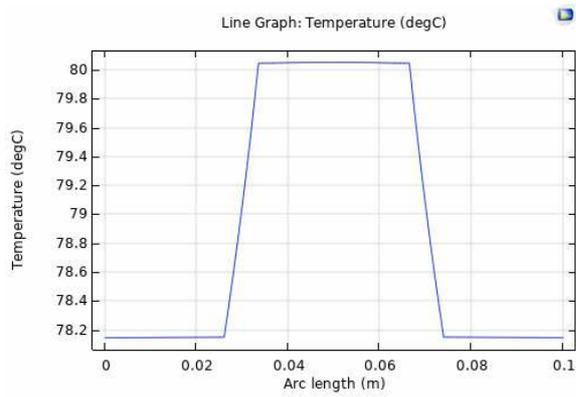
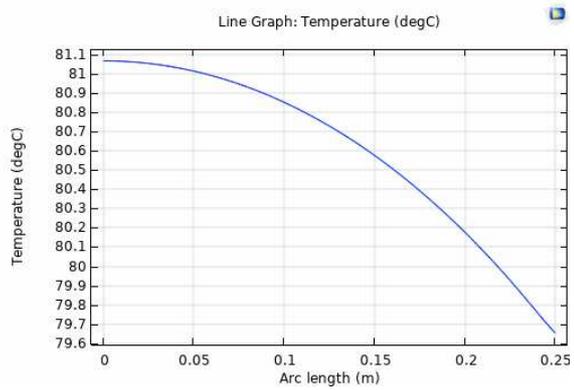
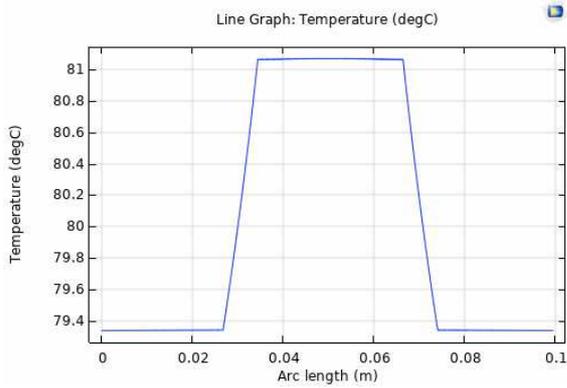


Рис. 5. Распределение температуры в кабельных муфтах с дополнительными слоями из медно-графенового композита



а



б

Рис. 6. Графики распределения температуры в кабельных муфтах с дополнительными слоями из медно-графенового композита, проложенных в земляном массиве: а) левая муфта; б) правая муфта

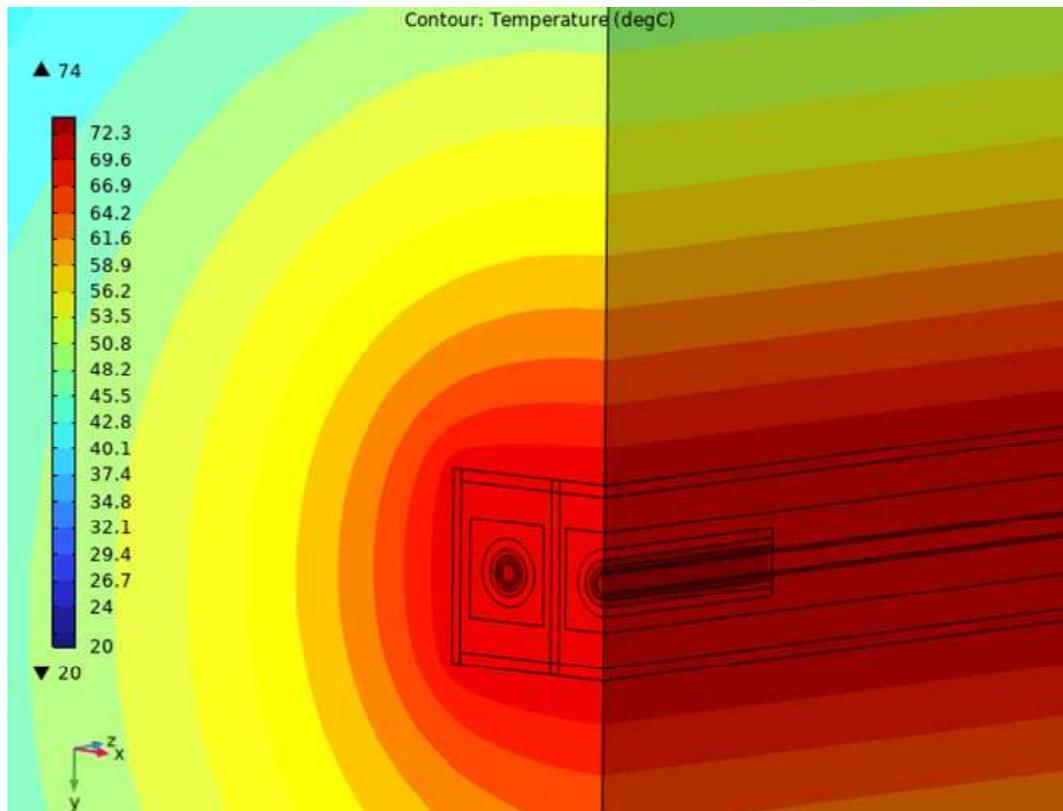


Рис. 7. Распределение температуры в кабельных муфтах с дополнительными слоями из медно-графенового композита помещенные в конструкцию с перегородкой

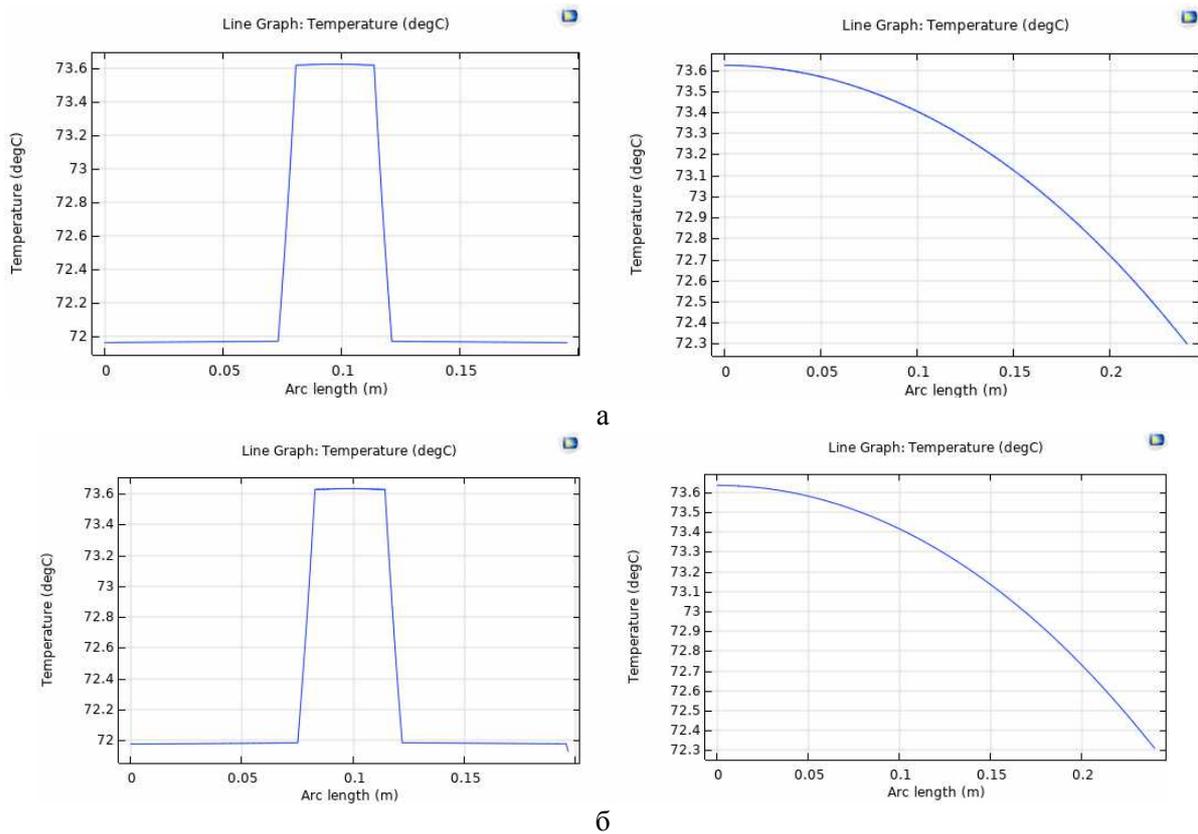


Рис. 8. Графики распределения температуры в кабельных муфтах с дополнительными слоями помещенных в конструкцию с перегородкой из медно-графенового композита, проложенных в земляном массиве: а) левая муфта; б) правая муфта

Выводы

В результате проведенного исследования была разработана математическая модель температурного поля в кабелях с соединительными муфтами, проложенными в грунте, при использовании метода конечных элементов. Установлено, что использование медно-графеновых композитов в кабельных муфтах способствует снижению температуры в кабельной системе и предотвращению перегревов за счет высокой теплопроводности материала.

Таким образом, использование медно-графеновых композитов в кабельных муфтах способствует повышению долговечности и обеспечению более надежной работы кабельных систем.

Список литературы

1. Ochoń P., Pobędza J., Walczak P., Cisek P., Vallati A. Experimental Validation of a Heat Transfer Model in Underground Power Cable Systems // *Energies*. 2020, vol. 13, p. 1747. doi.org/10.3390/en13071747.
2. Cywiński A., Chwastek K. A Multiphysics Analysis of Coupled Electromagnetic-Thermal Phenomena in Cable Lines // *Energies*. 2021, vol. 14, p. 2008. doi.org/10.3390/en14072008.
3. Exizidis L., Papagiannopoulos I., Chatziathanasiou V., Gilbert De Mey, Więcek B. Evaluation of a buried power cable's thermal behavior using phase diagrams and calculation of the phase difference between temperature and power // *Applied Thermal Engineering*. 2014, vol. 70, iss. 1, pp. 770-775. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.05.101.
4. Болгарский А.В., Мухачев Г.А., Шукин В.К. Термодинамика и теплопередача: учеб. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1975. – 495 с.
5. Григорьева М.М., Кузнецов Г.В. Тепломассоперенос в условиях электрической перегрузки кабельных линий // *Известия Томского политехнического университета*. – 2010. – Т. 316, № 4. – С. 34-38.
6. Электротехнический завод «КВТ». 1ПСТ-10-150/240: Муфта кабельная соединительная [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://kvt.su/prod/cable-terminations/cable-terminations-10kv/1pst10/sku_55072/
7. Кабельная поисковая система. Кабель СБГ 1x240 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kps.ru/spravochnik/kabeli-silovyye/s-bumajnoi-izolyaciei/sbg-1kv/kabel-sbg-1x240.html>.
8. Ларина Э.Т. Расчет допустимых нагрузок одножильных кабелей с пластмассовой изоляцией // *Электротехника*. – 1991. – № 3. – С. 28-31.

9. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов: справочник. – М.: Физматгиз, 1959. – 356 с.
10. Крыжановский В.К., Бурлов В.В., Паняматченко А.Д., Крыжановская Ю.В. Технические свойства полимерных материалов: учеб. пособие. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Профессия, 2005. – 248 с.
11. Graphene-Info: the graphene experts. Copper-graphene composites could lead to better electrical wires and motors [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.graphene-info.com/copper-graphene-composites-could-lead-better-electrical-wires-and-motors>.
12. Neeraj Mishra, Ylea Vlamidis, Leonardo Martini, Arianna Lanza, Zewdu M. Gebeyehu, Alex Jouvray, Marco La Sala, Mauro Gemmi, Vaidotas Mišeikis, Matthew Perry, Kenneth B. K. Teo, Stiven Forti, Camilla Coletti. Industrial Graphene Coating of Low-Voltage Copper Wires for Power Distribution // ACS Applied Engineering Materials. 2023, vol. 1, iss. 7, pp. 1937-1945. DOI: 10.1021/acsaenm.3c00249.
13. Material Properties. Graphene – Density – Strength – Melting Point [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://material-properties.org/graphene-density-strength-melting-point>.
14. Xingyi Huang, Chunyi Zhi, Ying Lin, Hua Bao, Guangning Wu, Pingkai Jiang, Yiu-Wing Mai. Thermal conductivity of graphene-based polymer nanocomposites // Materials Science and Engineering: R: Reports. 2020, vol. 142, p. 100577. doi.org/10.1016/j.mser.2020.100577.
15. Нагоев З.В., Ошхунув М.М. Метод дискретно-динамических частиц в задачах механики деформируемого твердого тела. // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2011. – №4. – С. 155-169.

References

1. Ochoń P., Pobędza J., Walczak P., Cisek P., Vallati A. Experimental Validation of a Heat Transfer Model in Underground Power Cable Systems // Energies. 2020, vol. 13, p. 1747. doi.org/10.3390/en13071747.
2. Cywiński A., Chwastek K. A Multiphysics Analysis of Coupled Electromagnetic-Thermal Phenomena in Cable Lines // Energies. 2021, vol. 14, p. 2008. doi.org/10.3390/en14072008.
3. Exizidis L., Papagiannopoulos I., Chatziathanasiou V., Gilbert De Mey, Więcek B. Evaluation of a buried power cable's thermal behavior using phase diagrams and calculation of the phase difference between temperature and power // Applied Thermal Engineering. 2014, vol. 70, iss. 1, pp. 770-775. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.05.101.
4. Bolgarsky A.V., Mukhachev G.A., Shchukin V.K. Thermodynamics and heat transfer: textbook. – 2nd ed., revised and additional. – М.: Higher School, 1975. – 495 p.
5. Grigorieva M.M., Kuznetsov G.V. Heat and mass transfer under conditions of electrical overload of cable lines // News of Tomsk Polytechnic University. 2010, vol. 316, no. 4. pp. 34-38.
6. Electrical plant "KVT". 1PST-10-150/240: Cable coupling [Electronic resource]. – URL: https://kvt.su/prod/cable-terminations/cable-terminations-10kv/1pst10/sku_55072/
7. Cable search engine. Cable SBG 1x240 [Electronic resource]. – URL: <https://k- ps.ru/spravochnik/kabeli-silovyie/s- bumajnoi-izolyaciei/sbg-1kv/kabel-sbg-1x240.html>.
8. Larina E.T. Calculation of permissible loads of single-core cables with plastic insulation // Electrical engineering. 1991, no. 3, pp. 28-31.
9. Chirkin V.S. Thermophysical properties of materials: reference book. – М.: Физматгиз, 1959. – 356 p.
10. Kryzhanovsky V.K., Burlov V.V., Panimatchenko A.D., Kryzhanovskaya Yu.V. Technical properties of polymer materials: textbook allowance. – 2nd ed., rev. and additional. – СПб.: Profession, 2005. – 248 p.
11. Graphene-Info: the graphene experts. Copper-graphene composites could lead to better electrical wires and motors [Electronic resource]. – URL: <https://www.graphene-info.com/copper-graphene-composites-could-lead-better-electrical-wires-and-motors>.
12. Neeraj Mishra, Ylea Vlamidis, Leonardo Martini, Arianna Lanza, Zewdu M. Gebeyehu, Alex Jouvray, Marco La Sala, Mauro Gemmi, Vaidotas Mišeikis, Matthew Perry, Kenneth B. K. Teo, Stiven Forti, Camilla Coletti. Industrial Graphene Coating of Low-Voltage Copper Wires for Power Distribution // ACS Applied Engineering Materials. 2023, vol. 1, iss. 7, pp. 1937-1945. DOI: 10.1021/acsaenm.3c00249.
13. Material Properties. Graphene – Density – Strength – Melting Point [Electronic resource]. – URL: <https://material-properties.org/graphene-density-strength-melting-point>.
14. Xingyi Huang, Chunyi Zhi, Ying Lin, Hua Bao, Guangning Wu, Pingkai Jiang, Yiu-Wing Mai. Thermal conductivity of graphene-based polymer nanocomposites // Materials Science and Engineering: R: Reports. 2020, vol. 142, p. 100577. doi.org/10.1016/j.mser.2020.100577.
15. Nagoev Z.V., Oshkhunov M.M. Method of discrete-dynamic particles in problems of mechanics of a deformable solid // News of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of solids. 2011, no. 4, pp.155-169.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Ошхунув Муаед Музафарович – доктор технических наук, профессор	Oshkhunov Muaed Muzafarovich – doctor of technical sciences, professor
Энес Ахмед Зулфикар – аспирант	Enes Ahmed Zulfikar – postgraduate student
ahmedenes@mail.ru	

Получена 11.03.2024