

Энергетика. Электротехника Energetics. Electrical engineering

Научная статья

УДК 621.315.2

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29201>



В.В. Титков ✉, *К.В. Волошин*, *П.Д. Тукеев*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ titkovprof@yandex.ru

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУР ДЛЯ ГРУППЫ ПАРАЛЛЕЛЬНО ПРОЛОЖЕННЫХ ПОДЗЕМНЫХ СИЛОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Аннотация. На основе теории потенциала разработана аналитическая методика расчета температур группы параллельно проложенных в земле силовых кабелей, которая применима, в частности, для случая трубно-блочной прокладки трехфазных кабельных линий высокого напряжения. Для реализации методики применимы простейшие средства вычислений настольных компьютеров. Для условий трубно-блочной прокладки приведены аналитические выражения эффективных коэффициентов теплопроводности структурных ячеек трубного блока с учетом твердотельной теплопередачи, конвекции и излучения. Предложено два алгоритма вычисления температур жил кабелей по найденной средней температуре структурной ячейки кабельного блока. Разработанная методика обеспечивает относительную ошибку оценки температур жил кабелей в блоке не хуже 3% при сравнении с результатами расчетов по методу конечных элементов. Методика допускает реализацию с помощью стандартных электронных таблиц.

Ключевые слова: кабель силовой, подземная кабельная линия, нагрев жил группы кабелей, трубно-блочная прокладка, аналитический расчет температур жил группы параллельных кабелей, тепловой режим кабелей в трубах, конвективный, радиационный и твердотельный теплообмен.

Благодарности: Работа профинансирована ПАО Ленэнерго Россети в рамках договора от «26» октября 2021 № 21-18080 Разработка стандарта организации «Методика расчета длительно-допустимых нагрузок кабельных линий 6-20 кВ проложенных в трубно-блочной канализации»

Для цитирования:

Титков В.В., Волошин К.В., Тукеев П.Д. Расчет температур для группы параллельно проложенных подземных силовых кабельных линий // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 2. С. 7–18. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29201>



V.V. Titkov , K.V. Voloshin, P.D. Tukeev

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

 titkovprof@yandex.ru

TEMPERATURE CALCULATION FOR A GROUP OF UNDERGROUND PARALLEL POWER CABLE LINES

Abstract. Based on the potential theory, an analytical method for calculating the temperatures of a group of power cables laid underground in parallel was developed. The technique is applicable in particular for the case of three-phase high-voltage cable lines laid in ducts. The analytical expressions are presented for effective thermal conductivity coefficients for elements of the duct taking into account conductive heat transfer, convection and radiation. Two algorithms are proposed for calculating the temperatures of cable cores based on the found average temperature of the element building duct. The developed technique provides a relative error of no more than 3% in estimating the temperature of the cable cores in the block when compared with the results of the FEM calculations. The method allows using standard spreadsheet software.

Keywords: power cable, underground power transmission cable line, heating of underground cable, cable duct, analytical calculation of parallel cable group temperature, heating mode of cables in tubes, convective, radiated and conductive heat exchange.

Acknowledgements: The research was financed by PJSC Lenenergo Rosseti under the agreement dated October 26, 2021 No. 21-18080 Development of the organization's standard "Methodology for calculating the long-term permissible loads of 6–20 kV cable lines laid in ducts"

Citation:

V.V. Titkov, K.V. Voloshin, P.D. Tukeev, Temperature calculation for a group of underground parallel power cable lines, *Global Energy*, 29 (02) (2023) 7–18, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29201>

Введение. Развитие кабельных систем гражданского и промышленного электроснабжения зачастую связано с компактной параллельной укладкой в грунте до нескольких десятков кабельных линий¹. В этих условиях нагрев индивидуальных кабелей существенно отличается в большую сторону от случая уединенной прокладки кабеля [1, 2]. Конструктивно параллельная прокладка может быть реализована в виде бетонного блока с отверстиями подходящего диаметра для протяжки кабеля [2] или пакета из размещаемых в грунте полимерных или асбестоцементных труб с кабелями, образующими трубный блок, как правило, прямоугольного сечения².

Несмотря на то, что детальные расчеты тепловых полей таких блоков достаточно сложны, современное программное обеспечение, реализующее метод конечных элементов, позволяет их проводить с использованием как настольных компьютеров, так и больших кластерных вычислительных систем. Последние применяются в случае точных расчетов процессов конвективного и лучистого теплообмена в трубных ячейках больших блоков [3–7].

Вместе с тем персонал, занятый эксплуатацией и проектированием силовых кабельных линий, как правило, не обладает необходимыми для качественного и успешного применения конечно-элементного программного обеспечения компетенциями и не имеет доступа к мощным

¹ Правила устройства электроустановок 6-7 издание. Глава 1.2 Электроснабжение и электрические сети. Утверждено Министерством энергетики Российской Федерации Приказ от 8 июля 2002 г. № 204 Введено в действие с 1 января 2003 г.

² Альбом проектных решений ТП-101-2016, ООО Энерготек, Санкт-Петербург 2018, 83 с. Официальное издание

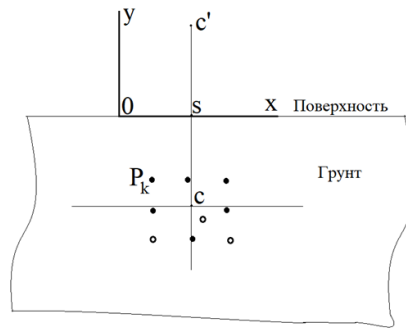


Рис. 1. К расчету температуры от совокупности линейных источников

Fig. 1. Temperature calculation from linear sources group

компьютерным средствам. При этом задачи, связанные с выбором нагрузочного тока в процессе эксплуатации кабельных линий или выбора сечений кабеля при проектировании, возникают постоянно.

В данной работе предлагается простой алгоритм расчета температур кабелей, составляющих блочную структуру, который легко реализуется с помощью стандартного программного обеспечения настольных компьютеров, такого как, например, табличный процессор свободно распространяемого ПО LibreOffice [8].

Вначале проанализируем нагрев совокупности кабелей, размещаемых непосредственно в грунте. Рассмотрим размещаемую в однородном грунте произвольную совокупность параллельных линейных источников нагрева, каждый из которых будем ассоциировать с однофазным кабелем, линейной мощностью тепловыделения P [Вт/м] (рис. 1).

Единичный линейный источник P_k в произвольной точке бесконечного пространства x, y создает нагрев с приращением температуры:

$$T_k(x, y) = \frac{P_k}{2\pi\lambda} \ln \frac{H_\infty}{\sqrt{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2}}, \quad (1)$$

где H_∞ – расстояние до удаленных от источника нагрева точек в среде, λ – коэффициент теплопроводности грунта³. Значение параметра H_∞ можно принять равным 10–20 м, полагая, что на таком расстоянии от источника влияние последнего на температуру грунта пренебрежимо мало. При действии произвольной совокупности линейных источников P_k с координатами следов в плоскости x, y : $x_k, y_k, k = 1 \dots M$ (рис. 1) нагрев произвольной точки в бесконечном пространстве рассчитывается суммированием действия всех источников. Применительно к системе кабелей, расположенных в грунте на некоторой конечной глубине, расчетное пространство не является бесконечным, а ограничено поверхностью грунта, где задана температура окружающей среды T_s . Для учета этого обстоятельства разместим в точке c' , расположенной относительно поверхности грунта симметрично центру тепловыделения совокупности источников c (рис. 1), фиктивный источник (сток) $P_{c'}$, действие которого в неограниченной среде совместно со всеми источниками P_k будет создавать заданную температуру на поверхности T_s :

$$\sum_{i=1}^M \frac{P_i}{2\pi\lambda} \ln \frac{H_\infty}{r_{si}} + \frac{P_{c'}}{2\pi\lambda} \ln \frac{H_\infty}{r_{c's}} = T_s, \quad (2)$$

где $r_{si} = \sqrt{(x_s - x_i)^2 + (y_s - y_i)^2}$, $r_{c's} = \sqrt{(x_s - x_{c'})^2 + (y_s - y_{c'})^2}$.

$$y_c = \frac{\sum_{k=1}^M y_k P_k}{\sum_{k=1}^M P_k}, \quad x_c = \frac{\sum_{k=1}^M x_k P_k}{\sum_{k=1}^M P_k}, \quad x_s = x_c, \quad y_s = 0, \quad x_{c'} = x_c, \quad y_{c'} = -y_c.$$

Откуда нетрудно найти:

$$P_{c'} = \frac{T_s - \sum_{i=1}^M \frac{P_i}{2\pi\lambda} \ln \frac{H_\infty}{r_{si}}}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{H_\infty}{r_{c's}}}.$$

Средняя температура в сечении кабеля k (или трубы при трубной прокладке) блока с произвольной конфигурацией, создаваемая, как собственным током с линейной мощностью нагрева P_k , так и всеми остальными кабелями блока P_i , а также фиктивным источником $P_{c'}$ находится по формуле:

$$T_k = \sum_{i=1}^M a_{k,i} P_i + b_k, \quad k = 1 \dots M, \quad (3)$$

$$\text{где } a_{k,i} = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{H_\infty}{r_{ki}} - \frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{H_\infty}{r_{si}} \frac{\ln \frac{H_\infty}{r_{c'k}}}{\ln \frac{H_\infty}{r_{c's}}}, \quad b_k = T_s \frac{\ln \frac{H_\infty}{r_{c'k}}}{\ln \frac{H_\infty}{r_{c's}}}, \quad r_{ki} = \begin{cases} \sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2} & k \neq i \\ R_k & k = i \end{cases}$$

R_k – радиус сечения кабеля k (или трубы при трубной прокладке), $P_k = n_k R_{ek}' I_k^2$, R_{ek}' – погонное электрическое сопротивление жилы кабеля, I_k – действующее значение тока по жиле, $n_k = 1$ для однофазного кабеля и $n_k = 3$ для трехфазной линии.

Формулы (3) позволяют найти среднюю температуру в сечении каждого бесструктурного линейного источника радиусом сечения R_k . Вместе с тем, непосредственный интерес представляет температура жилы кабеля, являющаяся критерием допустимости того или иного нагрузочного режима кабельного блока. Для вычисления температуры жилы при известных средней температуре в сечении кабеля и линейной мощности тепловыделения воспользуемся следующим подходом. Хорошо известно, что, в силу весьма высокой по сравнению с изоляционными материалами теплопроводности медных или алюминиевых жил силовых кабелей, незначительные изменения в пределах сечения жил можно не принимать во внимание, полагая температуру жилы в пределах ее сечения постоянной T_0 (рис. 2).

При расстояниях между отдельными кабельными линиями, превосходящими линейные размеры их поперечного сечения, температурное поле в пределах сечения кабеля можно принять осесимметричным. В этом случае закон изменения температуры по радиусу в изоляционном слое нетрудно найти путем решения стационарного уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах при отсутствии источника нагрева:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(\lambda_{ins} r \frac{dT}{dr} \right) = 0. \quad (4)$$

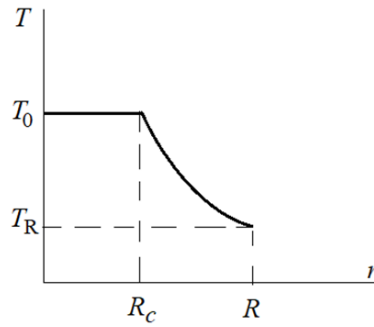


Рис. 2. Модельное распределение температуры в сечении однофазного кабеля
 Fig. 2. A model of temperature distribution in the one phase section cable

При заданных значениях температуры на границах интервала ($R_c \dots R$): T_0 и T_R соответственно и теплопроводности изоляции λ_{ins} имеем

$$T(r) = T_R + (T_0 - T_R) \frac{\ln(R/r)}{\ln(R/R_c)}.$$

Зная закон изменения температуры по радиусу (рис. 2) в сечении кабеля, нетрудно найти среднюю по сечению температуру

$$T = \frac{1}{\pi R^2} \left\{ \pi R_c^2 T_0 + \pi R^2 T_R + \frac{T_0 - T_R}{\ln(R/R_c)} 2\pi \int_{R_c}^R \ln \frac{R}{r} dr \right\}.$$

Откуда имеем:

$$T = fT_0 + (1-f)T_R, \quad (5)$$

где $f = \frac{1 - R_c^2/R^2}{2 \ln(R/R_c)}$.

Вновь обратимся к уравнению (4) и решим его, задав на левой границе интервала ($R_c \dots R$) тепловой поток, создаваемый резистивными потерями в жиле $nR'_e I^2$. При этом получим:

$$T_0 = T_R + nR'_e I^2 \frac{\ln(R/R_c)}{2\pi\lambda_{ins}}.$$

Исключая с помощью последнего выражения T_R из (5), найдем простую формулу, связывающую среднюю температуру T в сечении кабеля с температурой жилы T_0 :

$$T_0 = T + \frac{nR'_e I^2}{4\pi\lambda_{ins}} \left[2 \ln \frac{R}{R_c} - 1 + \frac{R_c^2}{R^2} \right], \quad (6)$$

Таким образом, с помощью (3) и (6) находим температуры жил каждого кабеля блока:

$$T_k = T_\infty + \frac{nR'_{ek} I^2}{4\pi\lambda_{ins}} \left[2 \ln \frac{R_k}{R_{ck}} - 1 + \frac{R_{ck}^2}{R_k^2} \right] + \sum_{i=1}^M a_{k,i} R'_{ei} I_i^2 + b_k, \quad k = 1 \dots M, \quad (7)$$

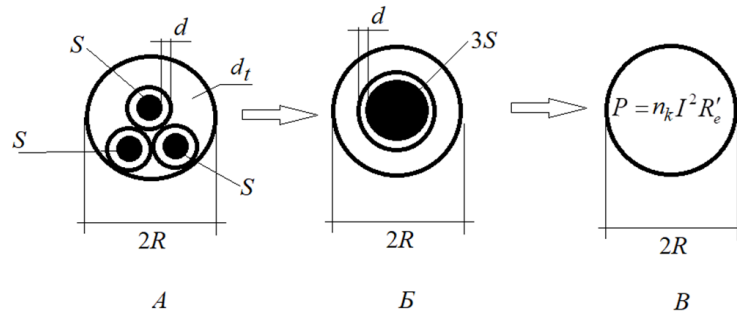


Рис. 3. Преобразование трубной ячейки кабельного блока (А) к коаксиальной структуре (Б) и к линейному бесструктурному источнику нагрева (В)

Fig. 3. A transformation of duct tube cell (A) to coaxial structure (B) and homogeneity heat source (B)

где выражения для $a_{k,i}$ и b_k представлены формулами (3), T_∞ – температура удаленного грунта (при $H_\infty \approx 10$ м, $T_\infty \approx 4-6$ °С).

При трубной прокладке кабеля описанная выше модель может быть применена, если в качестве бесструктурного линейного источника нагрева рассматривать саму трубу с размещенными внутри нее кабелями (рис. 3). Для расчета температуры жил кабелей (рис. 3А) можно использовать вышеприведенные формулы, если заместить исходную конфигурацию коаксиальной структурой (рис. 3Б) с радиусом проводящей жилы, равным $R_c = \sqrt{3S/\pi}$, где S – сечение фазных жил в исходной конфигурации. Однако, входящий в (7) коэффициент теплопроводности изоляции λ_{ins} следует оценить с учетом конвективного и лучистого теплообмена в воздушной области при $R > r > R_c + d$, где d – толщина фазной изоляции. При этом эквивалентная теплопроводность среды между жилой и внешней поверхностью стенки трубы (рис. 3Б) согласно⁴ составит:

$$\lambda_{ins e} = \frac{\ln \frac{R}{R_c}}{\left(\frac{1}{\lambda_{ins}} \ln \frac{R_c + d}{R_c} + \frac{1}{\lambda_{air}} \ln \frac{R - d_t}{R_c + d} + \frac{1}{\lambda_t} \ln \frac{R}{R - d_t} \right)}, \quad (8)$$

где λ_{ins} – теплопроводность твердой изоляции кабеля, λ_{air} – теплопроводность воздушной области, λ_t , d_t – теплопроводность и толщина стенки трубы.

Если теплопроводность твердотельных компонент является табличным значением, то эффективный коэффициент теплопроводности воздушной области определяется такими процессами, как конвекция и излучение, зависящими от температуры и размера воздушной области. Можно использовать приближенную формулу для теплопроводности коаксиала с газовой изоляцией [9, 10]

$$\lambda_{air} = \varepsilon \lambda_0 + \chi R_c \ln \frac{R - d_t}{R_c + d}, \quad (9)$$

где ε – поправочный множитель к теплопроводности неподвижного воздуха при рабочей температуре кабеля $\lambda_0 \approx 0.03$ Вт/м·К, d – толщина твердой изоляции, d_t – толщина стенки трубы.

Расчетные формулы для конвективной поправки ε приведены в различных работах и руководствах [13–16]. Здесь будем использовать данные работы [16], в которой получены расчетные формулы для оценки поправочного коэффициента для теплопроводности в коаксиале на основе тщательно выполненного эксперимента.

$$\text{При этом } \varepsilon = Nu/Nu_{cond}, \text{ где } Nu = \left[(Nu_{cond})^{15} + (Nu_{conv})^{15} \right]^{1/15}, Nu_{cond} = 2/\ln(R/R_c), Nu_{conv} = \\ = [1/Nu'_i + 1/Nu'_0]^{-1}, Nu'_i = \frac{2}{\ln \left[1 + \frac{2}{\left[(0.5Ra_{Dc}^{1/4})^{15} + (0.12Ra_{Dc}^{1/3})^{15} \right]^{1/15}} \right]},$$

$$Nu'_0 = \frac{-2}{\ln \left[1 - \frac{2}{\left[(0.5Ra_D^{1/4})^{15} + (0.12Ra_D^{1/3})^{15} \right]^{1/15}} \right]}, Ra_{Dc} = 9.8\beta\Delta\theta D_c^3/\nu\alpha, Ra_D = 9.8\beta\Delta\theta D^3/\nu\alpha,$$

$D_c = 2R_c$, $D = 2R$, $\nu = 20 \cdot 10^{-6}$ м²/с – кинематическая вязкость воздуха

Второе слагаемое в (9) описывает радиационную составляющую коэффициента теплопроводности [10]. При этом

$$\chi = 5.67 \cdot 10^{-8} g \left[(T_0 + 273)^2 + (T_0 - \Delta\theta + 273)^2 \right] \cdot [2(T_0 + 273) - \Delta\theta],$$

T_0 – предполагаемая температура жилы °С, $\Delta\theta = 10\text{--}20$ °С – перепад температуры между жилой и оболочкой, $g = 0.8\text{--}0.9$ – степень черноты поверхности полимерных материалов, применяемых в кабельной изоляции и трубах. Для допустимой температуры жил бумажно-пропитанных (65 °С) и сшитого-полиэтиленовых (90 °С) кабелей коэффициент χ составляет 7.2 Вт/м²·К и 9 Вт/м²·К соответственно. Допустимость приближенной формулы (9) обоснована, в частности, сравнением с результатами экспериментов и конечно-элементными расчетами, учитывающими конвективный и лучистый теплообмен в случае трехфазной кабельной линии с изоляцией из сшитого полиэтилена, проложенной в трубах диаметром 140 мм и 280 мм [11, 12].

При плотной укладке труб в блоке в расчетных формулах (3) целесообразно использовать эффективную теплопроводность грунта λ_e , учитывающую то обстоятельство, что средняя теплопроводность в сечении блока λ_b , отличается от грунтовой λ . При этом

$$\lambda_e = \frac{\ln \frac{H_\infty}{R_c}}{\frac{1}{\lambda_b} \ln \frac{R_b}{R_c} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{H_\infty}{R_b}},$$

где эквивалентный линейный размер поперечного сечения блока $R_b = 2R\sqrt{N_x N_y/\pi}$, N_x , N_y – размерность блока в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно. Для блока, выполненного из одинаковых труб и кабелей, среднее значение теплопроводности блока совпадает с усредненным по сечению единичной квадратной ячейки блока (рис. 6) коэффициентом теплопроводности λ_c . Последнюю можно найти с помощью эмпирической формулы, полученной авторами при обработке результатов конечно-элементных расчетов при различных сочетаниях значений радиусов сечения кабеля R_c и трубы R :

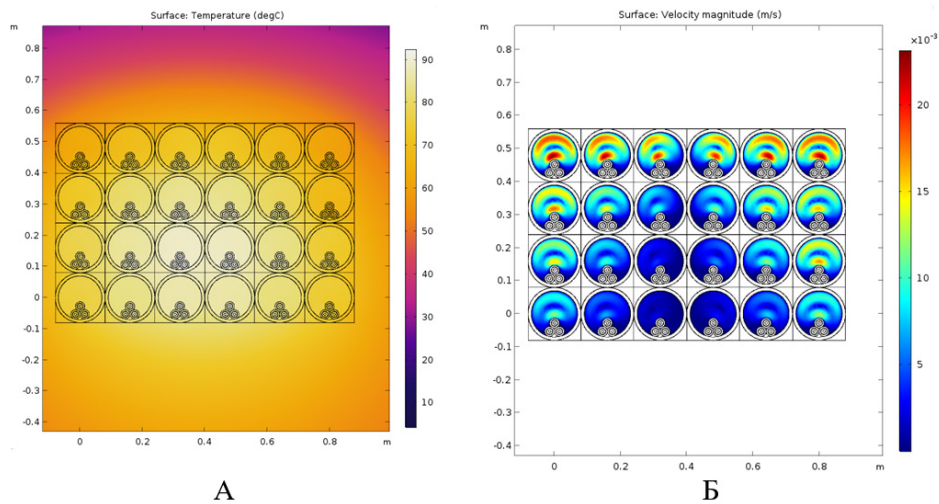


Рис. 4. Поля температуры (А) и скорости конвективного течения (Б) в трубном блоке 6×4, рассчитанные по методу конечных элементов

Fig. 4. Temperature (A) and flow velocity (B) fields in the 6×4 duct calculated by finite elements method

$$\lambda_c = \lambda_{ins e} \left(a + b \cdot \exp \left(c \frac{R_c}{R} \right) \right), \quad (10)$$

где $a = 1.05 \left(\frac{\lambda_{ins e}}{\lambda} \right)^{-0.23}$, $b = 0.02$, $c = 5.97$.

Рассмотрим пример расчета температур кабелей в прямоугольном трубном блоке (рис. 4) размерностью $N_x \times N_y = 6 \times 4$ с заглублением в грунт на 80 см. Полимерные трубы диаметром 160 мм и толщиной стенки 1 см уложены вплотную. В каждой трубе размещена трехфазная кабельная линия с изоляцией из сшитого полиэтилена с сечением фазной жилы 50 мм², погонным электрическим сопротивлением 759 мкОм/м и толщиной фазной изоляции 6.2 мм. Теплопроводность грунта и твердотельной изоляции соответственно 0.6 Вт/м·К и 0.4 Вт/м·К, температура поверхности грунта 10 °С. Все кабельные линии нагружены фазным током 54 А. На рис. 4 приведены поля температуры и скорости конвективного течения воздуха в трубах для описанных условий, полученные численно по методу конечных элементов путем совместного решения уравнений твердотельной теплопроводности, газовой динамики и переноса тепла излучением.

Расчетные температуры жил, полученные по методу конечных элементов с полной физической моделью, сравниваются с описанной выше методикой, основанной на выражении (7), на рис. 5 А, Б. Для рассматриваемого примера абсолютная погрешность не превосходит 4 °С в условиях максимально допустимых температур для кабелей данного типа (90 °С), что составляет менее 5%. Погрешность аналитического расчета связана с рядом причин. Вследствие различия скоростей конвективного течения имеет место зависимость коэффициентов теплопроводности воздушных областей сечения труб от положения трубы в блоке. Приближение осесимметричного теплового поля не строго выполняется вблизи кабеля, в частности, для угловых ячеек блока (рис. 4 Б).

Погрешность, вызванную последним обстоятельством, можно снизить, если применить несколько иную схему расчета, основанную на формулах (3). При этом полученные выше формулы (3) применяются для расчета температур не в точках размещения кабелей x_k, y_k , а в узлах l, m ($l = 1 \dots N_y + 1, m = 1 \dots N_x + 1$) ячеистой структуры (рис. 6), т.е. в этом случае в формулах (3)

70.3	76.5	79.5	79.5	76.5	70.3
78.5	86	89.3	89.3	86	78.5
81.5	89.1	92.4	92.4	89.1	81.5
79.1	85.8	88.8	88.8	85.8	79.1

А

73.2	80.4	83.8	83.8	80.4	73.2
81.6	90	93.9	93.9	90	81.6
84.4	92.9	96.9	96.9	92.9	84.4
81.8	89.2	92.7	92.7	89.2	81.8

Б

70.7	77.8	81.2	81.2	77.8	70.7
79	87.4	91.3	91.3	87.4	79
81.9	90.3	94.3	94.3	90.3	81.9
79.3	86.6	90.1	90.1	86.6	79.3

В

Рис. 5. Сравнение температур жил (°С) кабелей в блоке 6×4, рассчитанных с помощью полной физической модели методом конечных элементов (А); в приближении осесимметричного поля температуры вблизи жил кабелей по формулам (7) (Б); по уравнению баланса мощности в ячейках блока по формулам (3,10,11) (В)

Fig. 5. Comparison cables cores temperature in the 6×4 duct calculated by finite elements method with full physical model (А); by coaxial field near core model with formulas (7) (Б); by power balance in duct cells with formulas (3,10,11) (В)

r_{ki} , $r_{c'k}$ – расстояние в плоскости xu до узла $k = 1 \dots (N_x + 1)(N_y + 1)$ от кабеля i и от фиктивного источника соответственно, при этом $k = 1 + (N_x + 1)(m - 1)$ принимает все целые значения из сегмента $[1 \dots (N_x + 1)(N_y + 1)]$.

Записывая уравнение баланса тепловых потоков для отдельной ячейки (рис. 6), направление которых теперь можно считать произвольным, найдем температуры жил кабеля T_0 по формуле

$$T_0 = \frac{n_k R_e' I^2 + 2(T_r + T_l + T_t + T_b)\lambda_c}{8\lambda_c}, \quad (11)$$

где $T_l = \frac{1}{2}(T_1 + T_2)$, $T_r = \frac{1}{2}(T_3 + T_4)$, $T_t = \frac{1}{2}(T_1 + T_4)$, $T_b = \frac{1}{2}(T_3 + T_2)$.

T_1, T_2, T_3, T_4 – температуры в узлах (вершинах) ячейки (см. рис. 6), λ_c – средний в пределах ячейки коэффициент теплопроводности (10). Из рис. 5 В видно, что применение метода баланса потоков в структурной ячейке, наряду с простотой расчетных формул, позволяет снизить погрешность расчета до 2–3 %.

Заключение

Применение теории потенциала для расчета стационарного температурного поля позволяет построить относительно простые и доступные для широкого инженерного применения алгоритмы оценки температур группы параллельно располагаемых кабелей. Совместное применение этого подхода и известных аналитических соотношений, описывающих перенос тепла конвекцией и излучением в замкнутых объемах, позволило разработать общедоступную методику оценки температур кабельных жил при трубно-блочной прокладке, не требующую применения специального программного обеспечения. При этом для ее реализации пригодны простейшие средства вычислений для настольных компьютеров, включая стандартные табличные процессоры.

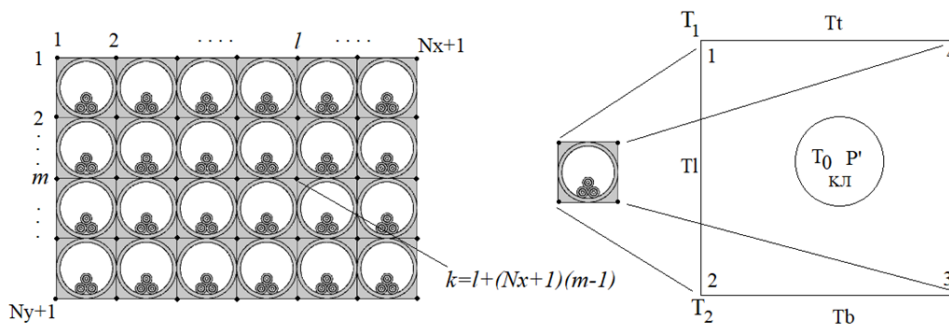


Рис. 6. К описанию расчета температуры жил кабеля методом баланса мощности в структурной ячейке блока
 Fig. 6. Calculation of cable cores temperature by the method of power balance in the structural cell of the duct

На примере трубного блока размерностью 6×4 показано, что по сравнению с расчетом по методу конечных элементов, выполненного с полным учетом газодинамического течения и радиационного теплообмена в трубах блока, разработанный в данной работе простой алгоритм обеспечивает погрешность оценки температур жил не хуже 3%. При практической реализации методики для оценки температур жил кабелей можно рекомендовать подход, основанный на уравнении баланса тепловых потоков в квадратной структурной ячейке (11), обеспечивающий более высокую точность оценки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Халитов В. Кабели со СПЭ-изоляции. расчет блочной канализации, Режим доступа: <https://protectorflex.ru/stati/kabeli-so-spe-izolyatsiy-raschet-blochnoy-kanalizatsii/>, Санкт-Петербург, Дата обращения: 16.09.2022
- [2] ООО «ЭНЕРГОТЕК» Допустимый ток при прокладке кабельных линий в трубах// Энергоэнергия. Передача и распределение. 2023. №1(76). январь-февраль. Режим доступа: <https://eepig.ru/article/dopustimyj-tok-kabelnoj-linii-pri-prokladke-v-nbsp-trubah> Дата обращения: 08.03.2023
- [3] Халитов В.Р. Расчет блочной канализации для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена// Энергоэксперт. 2020. № 4, с. 28–33.
- [4] Труфанова Н.М., Будаян В.А. Нестационарная задача тепломассопереноса при прокладке кабеля в зданиях и сооружениях // Вестник Пермского национального политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2017. № 23. с. 5–16.
- [5] Труфанова Н.М., Кухарчук И.Б., Феофилова Н.В. Расчет теплового поля кабельного канала с учетом потерь в экранах кабеля // Вестник Пермского национального политехнического университета. Электротехника информационные технологии, системы управления. 2018. № 28, с. 179–193.
- [6] Trufanova N.M., Kazakova A.V., Kukharchuka I.B. An Analysis of Cable-Trough Capacity // ISSN 1068-3712, Russian Electrical Engineering, 2022, Vol. 93, No. 11, pp. 681–684. © Allerton Press, Inc., 2022. Russian Text © The Author(s), 2022, published in Elektrotehnika, 2022, No. 11, pp. 2–5.
- [7] Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Математическое моделирование процессов переноса тепла и массы в кабельном канале и определение рациональной передаваемой мощности кабелей// Прикладная математика, механика и процессы управления. 2013. т. 1. с. 217–227.
- [8] OpenOffice.org 3 Calc [Текст] / сост. Н.Б. Кульгин, Л.Б. Цой. – Санкт-Петербург 2009. :БХВ-Петербург. – 192 с.
- [9] Кукеков Г.А. Выключатели переменного тока высокого напряжения [Текст]. – 2-е изд., перераб. и доп. - Ленинград : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1972. – 338 с. : ил.; 22 см.

- [10] **Михеев М.А., Михеева И.М.** Основы теплопередачи [Текст]. – 2-е изд., стереотипное- М.: Энергия, 1977, 384 с. С илл.
- [11] **Лубков А.Н., Титков В.В., Тукеев П.Д.** Исследования теплового режима трёхфазной кабельной линии в условиях прокладки в полимерных трубах // Известия НТЦ Единой энергетической системы 2018. № 1 (78). с. 93–108.
- [12] **Лубков А.Н., Титков В.В., Тукеев П.Д.** Тепловой режим кабельной линии в полимерной трубе // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 48. 3. с. 84–90.
- [13] **Svein M. Helleso, Espen Eberg.** Simplified model for heat transport for cables in pipes // IEEE Transactions on Power Delivery. 2021. p. 3137876.
- [14] **Sedaghat A., Lu H., Bokhari A., F. de Leon.** Enhanced Thermal Model of Power Cables Installed in Ducts for Ampacity Calculations // IEEE Transactions on Power Delivery. October 2018. Vol. 33. p. 2404–2411.
- [15] **Incropera F.P., Dewitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S.** Fundamentals of heat and mass transfer, 6th ed. [Text]. 2007. Hoboken, New Jersey: John Wiley. 912 pp.
- [16] **Kuehn T.H., Goldstein R.J.** An experimental study of natural convection heat transfer in concentric and eccentric horizontal cylindrical Annuli // Journal of heat transfer. 1978. V. 100. 11. pp. 635–640.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТИТКОВ Василий Васильевич – профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.
E-mail: titkovprof@yandex.ru

ВОЛОШИН Кирилл Валерьевич – ассистент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
E-mail: kir_vol@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1334-7452>

ТУКЕЕВ Павел Дмитриевич – аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
E-mail: paultuk@yandex.ru

REFERENCES

- [1] **V. Khalitov**, Kabeli so SPE-izolyatsiyey. raschet blochnoy kanalizatsii (Cables with XPLE insulation, ducts calculation), Rezhim dostupa: <https://protectorflex.ru/stati/kabeli-so-spe-izolyatsiyey-raschet-blochnoy-kanalizatsii/>, Sankt-Peterburg, Data obrashcheniya 16.09.2022
- [2] **ООО «ENERGOTEK»** Dopustimyy tok pri prokladke kabelnykh liniy v trubakh (available current for transmission cable lines in tubes) // Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye. 2023. № 1 (76). yanvar-fevral. Rezhim dostupa: <https://eepir.ru/article/dopustimyj-tok-kabelnoj-linii-pri-prokladke-v-nbsp-trubah> Data obrashcheniya 08.03.2023
- [3] **V.R. Khalitov**, Raschet blochnoy kanalizatsii dlya kabeley s izolyatsiyey iz sshitogo polietilena (Calculation of block duct system for cables with insulation made of cross-linked polyethylene) // Energoekspert. 2020. № 4, s. 28–33.
- [4] **N.M. Trufanova, V.A. Budayan**, Nestatsionarnaya zadacha teplomassoperenosa pri prokladke kabelya v zdaniyakh i sooruzheniyakh // (Non stationary problem of heat-mass transfer in the case of cables mouted in buildings and structures) Vestnik Permskogo natsionalnogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnyye tekhnologii, sistemy upravleniya. 2017. № 23. s. 5–16.

[5] **N.M. Trufanova, I.B. Kukharchuk, N.V. Feofilova**, Raschet teplovogo polya kabelnoko kanala s uchedom poter v ekranakh kabelya (Duct temperature field calculation with cable shields losses taking into account) // Vestnik Permskogo natsionalnogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika informatsionnyye tekhnologii, sistemy upravleniya. 2018. № 28, s. 179–193.

[6] **N.M. Trufanova, A.V. Kazakova, I.B. Kukharchuka**, An Analysis of Cable-Trough Capacity // ISSN: 1068-3712, Russian Electrical Engineering, 2022, Vol. 93, No. 11, pp. 681–684. © Allerton Press, Inc., 2022. Russian Text © The Author(s), 2022, published in Elektrotehnika, 2022, No. 11, pp. 2–5.

[7] **Ye.Yu. Navalikhina, N.M. Trufanova**, Matematicheskoye modelirovaniye protsessov perenosa tepla i massy v kabelnom kanale i opredeleniye ratsionalnoy peredavayemoy moshchnosti kabeley (Math simulation of heat-mass transfer in air channel and rational ampacity determination) // Prikladnaya matematika, mekhanika i protsessy upravleniya. 2013. t. 1. s. 217–227.

[8] OpenOffice.org 3 Calc [Tekst] / sost. N.B. Kultin, L.B. Tsoy. – Sankt-Peterburg 2009. :BKhV-Peterburg. – 192 s.

[9] **G.A. Kukekov**, Vyklyuchateli peremennogo toka vysokogo napryazheniya (AC high voltage switch gears) [Tekst]. – 2-ye izd., pererab. i dop. – Leningrad : Energiya. Leningr. otd-niye, 1972. – 338 s. : il.; 22 sm.

[10] **M.A. Mikheyev, I.M. Mikheyeva**, Osnovy teploperedachi (Heat transfer basics), [Tekst]. – 2-ye izd., stereotipnoye – M.: Energiya, 1977, 384 s. S ill.

[11] **A.N. Lubkov, V.V. Titkov, P.D. Tukeyev**, Issledovaniya teplovogo rezhima trekhfaznoy kabelnoy linii v usloviyakh prokladki v polimernykh trubakh (A heating mode study of three phase high voltage cable transmission in polymer tube) // Izvestiya NTTs Yedinoy energeticheskoy sistemy 2018. № 1 (78). s. 93–108.

[12] **A.N. Lubkov, V.V. Titkov, P.D. Tukeyev**, Teplovoy rezhim kabelnoy linii v polimernoy trube (Heating mode of cable transmission in polymer tube) // Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye. 2018. № 48. 3. s. 84–90.

[13] **Svein M. Helleso, Espen Eberg**, Simplified model for heat transport for cables in pipes // IEEE Transactions on Power Delivery. 2021. p. 3137876.

[14] **A. Sedaghat, H. Lu, A. Bokhari, F. de Leon**, Enhanced Thermal Model of Power Cables Installed in Ducts for Ampacity Calculations // IEEE Transactions on Power Delivery. October 2018. Vol. 33. p. 2404–2411.

[15] **F.P. Incropera, D.P. Dewitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine**, Fundamentals of heat and mass transfer, 6th ed. [Text]. 2007. Hoboken, New Jersey: John Wiley. 912 pp.

[16] **T.H. Kuehn, R.J. Goldstein**, An experimental study of natural convection heat transfer in concentric and eccentric horizontal cylindrical Annuli // Journal of heat transfer. 1978. V. 100. 11. pp. 635–640.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Vasily V. TITKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: titkovprof@yandex.ru

Kirill V. VOLOSHIN – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: kir_vol@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1334-7452>

Pavel D. TUKEEV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: paultuk@yandex.ru

Поступила: 08.03.2023; Одобрена: 01.04.2023; Принята: 10.04.2023.

Submitted: 08.03.2023; Approved: 01.04.2023; Accepted: 10.04.2023.