

УДК 536.2:532.5

Е.Ю. Навалихина, Н.М. ТруфановаПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА
В КАБЕЛЬНОМ КАНАЛЕ, ПРОЛОЖЕННОМ В ЗЕМЛЕ**

Построена математическая модель процессов конвективного теплообмена в кабельном канале, проложенном в земле без учета и с учетом теплового излучения. Приведена зависимость температуры на поверхности кабеля от разбиения на конечные элементы. Получены траектории движения частиц в кабельном канале, поля температур. Представлены зависимости температуры на поверхности кабельного канала от теплопроводности различных конструктивных элементов в кабельном канале.

Ключевые слова: математическая модель, конвекция, кабельный канал, тепломассообмен.

E.U. Navalikhina, N.M. Trufanova

State National Research Polytechnic University of Perm, Perm, Russian Federation

**RESEARCH CONVECTION HEAT EXCHANGE
IN THE CABLE CHANNEL, LAID IN THE EARTH**

The mathematical model of processes convection heat exchange in the cable channel, laid in the ground without taking into account the thermal radiation. Shows the dependence of temperature on the surface of the cable division into finite elements Fields the trajectory of particle motion in the cable channel, the temperature field. Shows the dependence of temperature on the surface of the cable channel on the thermal conductivity of various structural elements in the cable channel.

Keywords: mathematical model, convection, the cable channel, heat mass exchange.

Кабельные линии, расположенные в канале, при нагрузке являются источниками теплового воздействия. Пропускная способность кабеля определяется температурой в кабельном канале, величина которой зависит от ряда факторов: геометрических параметров, теплофизических характеристик, свойств окружающей среды, условий теплообмена и других.

В статье рассматривается задача сложного тепломассообмена в кабельном канале, проложенном в земле.

Геометрические размеры шахты и расположение кабелей показаны на рис. 1. Шахта симметрична относительно оси ou . Внутри шахты находится воздух.

Решение задачи проводилось с учетом естественной конвекции воздуха в кабельном канале и лучистого теплообмена.

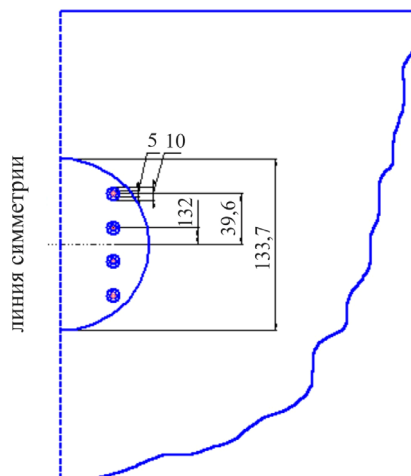


Рис. 1. Геометрические размеры кабельного канала

Математическая модель движения и теплообмена в канале основывается на законах сохранения массы, количества движения и энергии[1].

Были сделаны следующие допущения: задача стационарная, симметричная относительно оси ou , воздушная среда несжимаема, течение ламинарное, теплопроводность материалов постоянна, воздух трактуется как прозрачная среда, не поглощающая тепловое излучение, а граничные поверхности, участвующие в теплообмене, – как серые поверхности. Сложная конструкция изоляции, оболочки и других конструктивных элементов кабеля заменена однородным монолитом из резины с усредненными свойствами. Определяющие уравнения, описывающие процессы тепломассообмена для ламинарного несжимаемого воздушного потока в условиях естественной конвекции имеют следующий вид [2]:

уравнение движения

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

$$U_x \frac{\partial U_y}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial U_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{g\beta(T-T_0)}{\rho}; \quad (2)$$

уравнение неразрывности

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

уравнение энергии для воздуха

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

уравнение теплопроводности

– для кабельных линий

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + q_v = 0; \quad (5)$$

– для массива земли

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

Кинематическая вязкость воздуха зависит от температуры:

$$f(t) = \frac{\nu(T)}{\nu_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{0,76}. \quad (7)$$

Плотность воздуха определяется законом Буссинеска:

$$\rho(T) = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)]. \quad (8)$$

Здесь x , y – декартовы координаты; U_x , U_y – компоненты вектора скорости воздуха в канале; P – отклонение давления воздуха от гидростатического; t – температура, °C; c_p – удельная теплоемкость воздуха; g – ускорение свободного падения; ρ – плотность воздуха; λ – коэффициент теплопроводности; q_v – поток, определяемый мощностью передаваемой энергии.

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

– на границах канала и на поверхности кабелей задается условие непроницаемости и прилипания

$$U_x|_G=0; U_y|_G=0, \quad (9)$$

где G – соответствующая граница;

– на поверхности земли задано граничное условие третьего рода, коэффициент теплоотдачи поверхности земли равен $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$, а температура окружающей среды $t_0 \text{ } 20^\circ \text{C}$;

– на двух других границах в массиве земли заданы адиабатические условия теплообмена;

– на границах контакта разнородных сред задавались граничные условия четвертого рода и условия сопряжения температур.

В таблице приведены теплофизические свойства рассматриваемых материалов.

Теплофизические свойства материалов

Плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$	1,000
Теплоемкость воздуха, $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{K}$	1,005
Теплопроводность воздуха, $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{K}$	0,0242
Теплопроводность бетона и грунта, $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{K}$	0,8
Теплопроводность резины, $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{K}$	0,3

Задача конвективного теплообмена рассматривалась совместно с задачей лучистого теплообмена между сегментами поверхностей кабеля и границами кабельного канала. Сегментация границ определялась заданной сеточной моделью расчетной области. Угловые коэффициенты сегментов рассчитываются по методу натянутых нитей [3].

Расчет суммарной плотности радиационного потока на поверхностях выполняется матричным методом. Плотность эффективного излучения i -го сегмента поверхности определяется по формуле

$$J_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) F_{i-j} J_j, \quad (10)$$

где J_j – излучение сегмента j , $\text{Вт}/\text{м}^2$; F_{i-j} – угловой коэффициент от поверхности i к поверхности j ; ε_i – степень черноты поверхности i ; T_i – температура i -го сегмента поверхности, K ; σ – постоянная Стеффана-Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}^4)$.

Первый член правой части представляет собой собственное излучение сегмента, а второй – отраженное вследствие его облученности от всех других сегментов. Для N сегментов, участвующих в теплообмене, получаем систему N линейных уравнений для N неизвестных J_i , которые определяются из решения этой системы уравнений. Суммарная плотность радиационного потока на любом сегменте поверхности i есть разница между излученной энергией и потоком падающей лучистой энергии и может быть выражена как

$$q_i = \varepsilon_i \sigma T_i^4 - \varepsilon_i \sum_j^N F_{i-j} J_j, \quad (11)$$

Плотность радиационного потока можно рассчитать по уравнению (11) с помощью итерационной процедуры, используя значения J_i , полученные из системы уравнений (10), и линеаризованные члены T_i^4 , ограничиваясь первыми двумя членами его разложения в ряд Тейлора относительно $T_i|_k$:

$$T_i^4 = 4(T_i|_k)^3 T_i|_{k+1} - 3(T_i|_k)^4, \quad (12)$$

где $T_i|_k$ – температура сегмента поверхности из предыдущей итерации k [4].

Поставленная задача (1)–(12) решалась численно в среде инженерных расчетов *Fluent*. Для построения геометрической модели и разбиения ее на конечные элементы использовался препроцессор *ICEM CFD*. Сходимость решения задачи приведена на рис. 2, где представлено изменение температуры на поверхности кабелей.

Очевидно, что для получения достоверных результатов (максимальная невязка по температуре не превышает 0,1 %) можно ограничиться 100 000 узлов.

Для проверки адекватности модели произведено сравнение результатов, полученных по предлагаемой модели, с результатами работы [5].

Авторы в работе [5] рассматривали кабельный канал как горизонтальную шахту круглого сечения. На поверхности земли и двух других границах осесимметричной части канала задана температура 20 °С. Задача решалась без учета лучистой энергии.

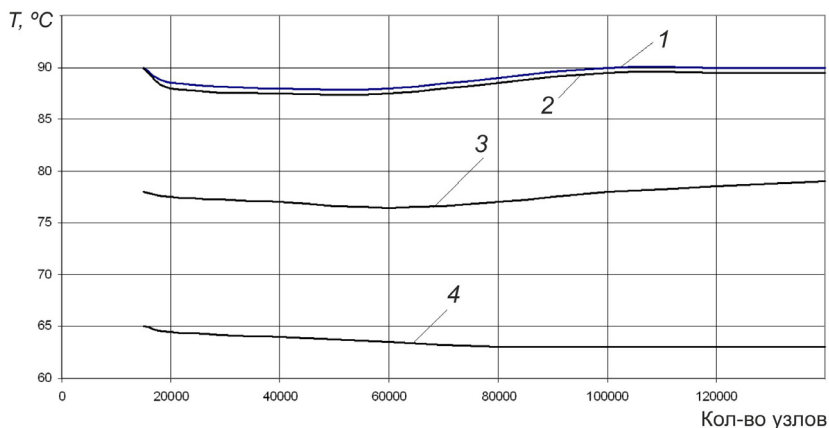


Рис. 2. Зависимость температуры на поверхности кабеля от разбиения на конечные элементы: 1 – первый кабель сверху, 2 – второй кабель, 3 – третий кабель, 4 – четвертый кабель

На рис. 3 приведена картина распределения температуры внутри кабельного канала, которое практически совпало с решением в работе [5]. Отличие по температуре не превышало 2 %, что подтверждает адекватность предложенной модели.

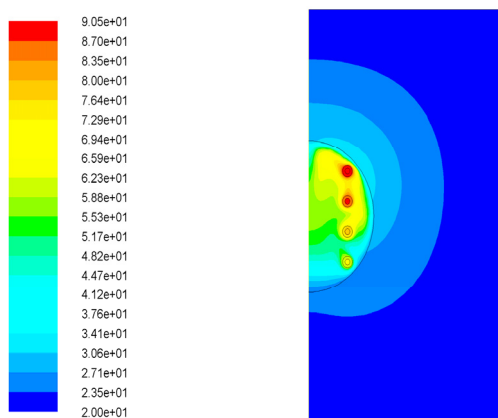


Рис. 3. Распределение температуры внутри кабельного канала

Из рисунка видно, что наиболее прогретым кабелем для модели [5] является верхний кабель. Пространство земли практически не прогревается. Это связано с тем, что на границах использовано граничное условие первого рода, не позволяющее адекватно описать процессы сложного теплообмена.

Поле скоростей в виде траекторий частиц представлено на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что поток воздуха поднимается от нижнего кабеля к верхнему и образует несколько вихрей. Сложное движение воздушного потока приводит к разогреву первого кабеля.

В результате решения задачи с использованием предложенной модели и граничных условий третьего рода на поверхности земли, а на двух других границах – адиабатических условий теплообмена получено существенно отличающееся поле температур как в канале, так и в массиве земли (см. рис. 3), (рис. 5, а).

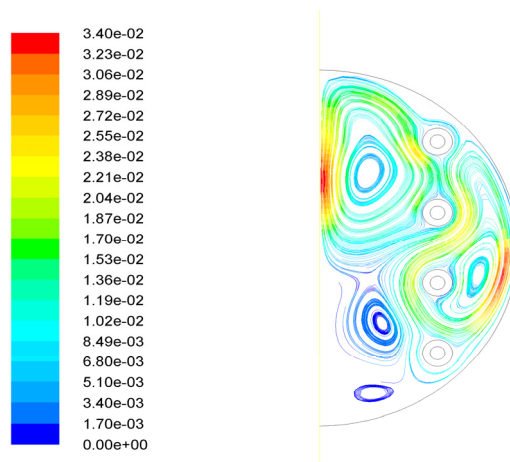


Рис. 4. Поле скорости в кабельном канале

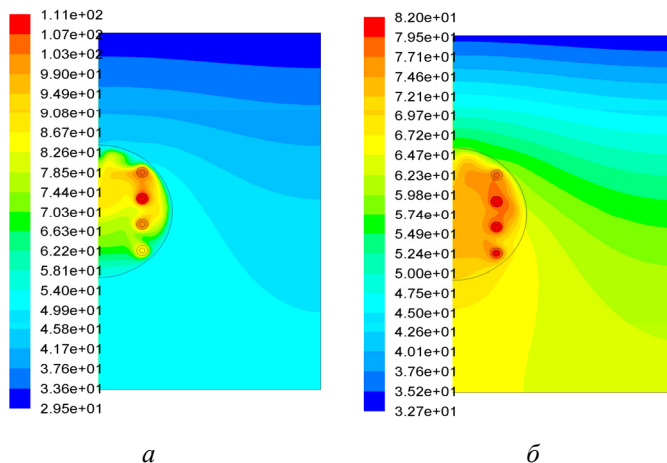


Рис. 5. Распределение температуры внутри кабельного канала и в массиве земли: *а* – без учета излучения; *б* – с учетом излучения

Из рис. 5 видно, что наиболее прогретым является второй кабель (в отличие от работы [5]), что связано со сложным движением воздуш-

ного потока. Температуры кабелей отличаются на 29°C . Различны поля скоростей, представленные в виде траекторий движения частиц (см. рис. 4 и рис. 6) по интенсивности течения и форме образующихся вихрей. На рис. 6 представлено поле скорости в канале по предложенной модели без учета лучистой энергии.

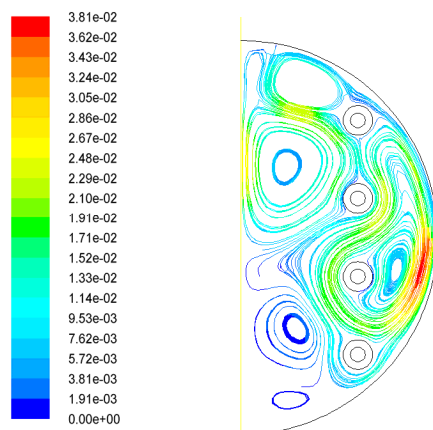


Рис. 6. Поле скорости в кабельном канале с новыми граничными условиями без учета лучистой энергии

Кроме того, происходит существенный прогрев грунта вокруг кабельного канала. Температура окружающего грунта $29,5^{\circ}\text{C}$, что на $9,5^{\circ}\text{C}$ больше, чем при граничном условии первого рода.

Влияние лучистого теплообмена не столь существенно изменяет картину температурного поля. Температура в массиве земли изменилась на $3,2^{\circ}\text{C}$, а в кабельном канале и на поверхности кабелей практически не изменилась.

Особый интерес представляет исследование влияния теплопроводности различных конструктивных элементов в кабельном канале (жилы (k_c), изоляции (k_i) и земли (k_{soi})) на поле температур в канале и температуру на поверхности кабелей.

На рис. 7–9 представлены зависимости температуры на поверхности различных кабелей от величины теплопроводности различных материалов.

Очевидно, что изменение теплопроводности жилы (см. рис. 7) при неизменных значениях остальных теплофизических характеристик (см. таблицу) практически не изменяет температуру на поверхности кабеля.

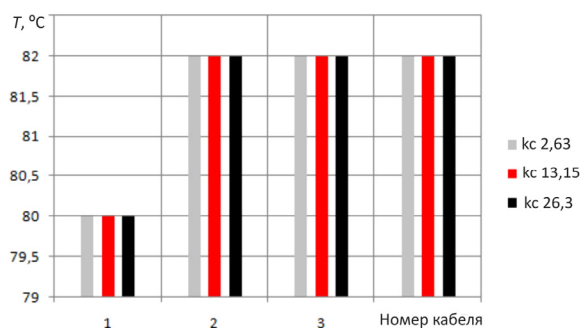


Рис. 7. Зависимость температуры на поверхности кабеля от теплопроводности жилы

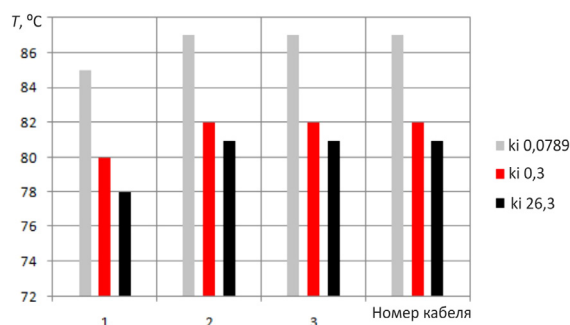


Рис. 8. Зависимость температуры на поверхности кабеля от теплопроводности изоляции

При уменьшении теплопроводности изоляции ($k_i = 0,0789$) температура увеличивается до 85 °C на первом кабеле, на остальных кабелях температура становится равной 87 °C . Полученная температура превышает допустимую температуру эксплуатации кабеля с резиновой изоляцией.

На рис. 9 представлена зависимость температуры на поверхности кабеля от величины теплопроводности грунта, величина которой может варьироваться в пределах от $0,8$ до $3,37$ в зависимости от климатических условий. При уменьшении теплопроводности грунта в 10 раз происходит резкое увеличение температуры до 295 °C , что приводит к перегреву изоляции. Из рис. 7–9 видно, что при стандартных значениях теплопроводности температура на поверхности ТПЖ не превышает 82 °C . Следовательно, при использовании изоляции токопроводящей жилы на основе натурального каучука (марка РТИ), у которой температурный индекс 60 °C , необходимо уменьшать нагрузку на линию. Для этиленпропиленовых резин (ТИ 110 °C) и кремнийорганических резин (ТИ 180 °C) нагрузку можно увеличить.

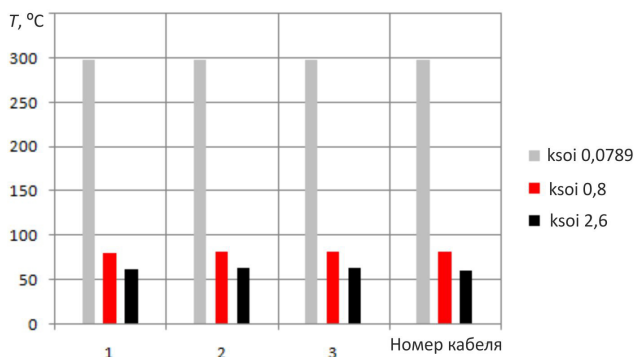


Рис. 9. Зависимость температуры на поверхности кабеля от теплопроводности грунта

Полученные результаты полезны, могут быть использованы при конструировании кабельного канала и кабельных линий и при расчете нагрузочной способности последних.

Работа выполнена при финансовой поддержке (грант №14-18-82011 23.11.2011).

Библиографический список

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 848 с.
2. Определение эксплуатационных характеристик кабелей, проложенных в кабельном канале/ А.Г. Щербинин [и др.] // Электротехника. – 2011. – № 11. – С. 16–19.
3. Крейт Ф., Блейк У. Основы теплопередачи. – М.: Мир, 1983. – 512 с.
4. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1984. – 632 с.
5. Yang Liu. Coupled conduction-convection PROBLEM for an underground duct containing eight insulated cables // International Journal of Computational Engineering Science. – 2000. – Vol. 1, No. 2. – P. 187–206. – Imperial College Press.

References

1. Loytsyanskiy L.G. Mechanics of a liquid and gas [*Mekhanika zhidkosti i gaza*]. Moscow: Nauka, 1973, 848 p.
2. Shcherbinin A.G, Trufanova N.M., Navalikhina E.Yu., Savchenko V.G. Definition of operational characteristics of the cables laid in

the cable channel [Opredelenie ekspluatatsionnykh kharakteristik kabeley, prolozhennykh v kabelnom kanale]. *Russian Electrical Engineering – Elektrotekhnika*, 2011, No. 11, pp. 16a–20.

3. Kreith F., Black W.Z. *Basic Heat Transfer*. Harper and Row, Publishers, New York, 1980, 512 p.

4. Tadmor Z., Gogos K. Principles of polymer processing [*Teoreticheskie osnovy pererabotki polimerov*]: Transl. from eng. Moscow, Khimiya, 1984, 632 p.

5. Yang Liu. Coupled conduction-convection PROBLEM for an underground duct containing eight insulated cables. *International Journal of Computational Engineering Science*. Vol. 1, No. 2 (2000) 187–206 Imperial College Press.

Об авторах

Навалихина Екатерина Юрьевна (Пермь, Россия) – аспирант кафедры конструирования и технологии в электротехнике Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ktei@pstu.ru).

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

About the authors

Navalikhina Ekaterina Yurievna (Perm, Russian Federation) – Post-graduate student of the chair «Designing and technology in electrical engineering, State National Research Polytechnic University of Perm (614990, 29, Komsomolsky prospect, Perm, Russian Federation, e-mail: ktei@pstu.ru).

Trufanova Nataliia Mikhailovna (Perm, Russian Federation) Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the chair «Designing and technology in electrical engineering», State National Research Polytechnic University of Perm (614990, 29, Komsomolsky prospect, Perm, Russian Federation, e-mail: ktei@pstu.ru).

Получено 19.02.2012