

Е.Ю. Навалихина, Н.М. Труфанова

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет

ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ И ВЫНУЖДЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ НА ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В КАБЕЛЬНОМ КАНАЛЕ

Построена математическая трехмерная модель процесса конвективного теплообмена в кабельном канале. Произведена оценка способов и условий вентилирования на температуру в кабеле, определены условия безопасной эксплуатации кабелей.

Согласно новым требованиям Градостроительного кодекса РФ линии высокого напряжения должны быть проложены под землей. Величина номинальной токовой нагрузки кабелей и долговечность кабельных линий в кабельном канале будут зависеть от большого числа факторов: геометрических параметров, теплофизических характеристик окружающей среды, условий теплообмена и многих других [1].

В данной работе рассмотрено влияние естественной и искусственной вентиляции кабельного канала на передаваемую мощность по кабельным линиям. Модель в трехмерном изображении представлена на рис. 1.

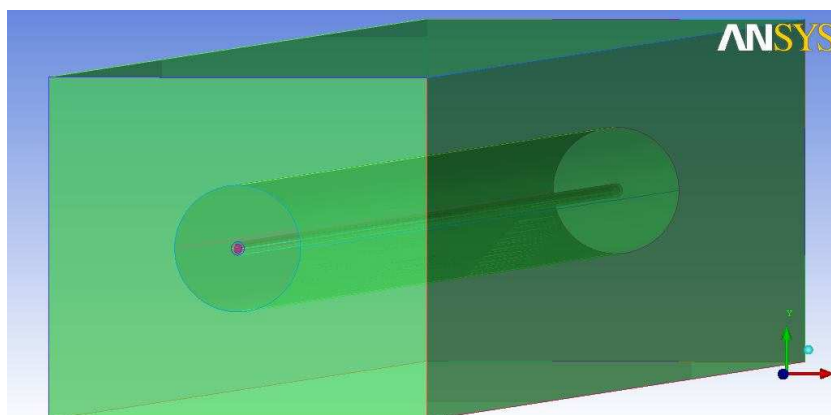


Рис. 1. Трехмерная модель кабельного канала с одним кабелем

Математическая модель движения и теплообмена воздуха в канале основывается на законах сохранения массы, количества движения и энергии [2].

Были сделаны следующие допущения: задача стационарная, симметричная относительно оси ou , течение ламинарное, теплопроводность материалов постоянна, сложная конструкция изоляции, оболочки и других конструктивных элементов кабеля заменена однородным монолитом из резины с усредненными свойствами.

С учетом сделанных предположений система дифференциальных уравнений, описывающих процессы тепломассопереноса в кабельном канале, имеет следующий вид:

– уравнение неразрывности:

$$\vartheta_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} = \rho \frac{\partial \vartheta_i}{\partial x_i}, \quad (1)$$

– уравнение движения:

$$\rho \vartheta_j \frac{\partial \vartheta_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \frac{\partial \vartheta_i}{\partial x_j} + f_i, \quad (2)$$

$$f_x = 0, \text{ а } f_y = \frac{g\beta(T - T_0)}{\rho}, f_z = 0,$$

– уравнение энергии для воздуха:

$$\rho c \vartheta_i \frac{\partial t}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x_j^2} + q_v, \quad (3)$$

– уравнение теплопроводности:

- кабельных линий

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_k \frac{\partial t}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial y_i} \left(\lambda_k \frac{\partial t}{\partial y_i} \right) + q_v = 0, \quad (4)$$

- массива земли

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\lambda_3 \frac{\partial t}{\partial x_i}) + \frac{\partial}{\partial y_i} (\lambda_3 \frac{\partial t}{\partial y_i}) = 0. \quad (5)$$

Плотность воздуха зависит от температуры по закону Буссинеска [3]:

$$\rho(T) = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)], \quad (6)$$

где ρ – плотность материала; x_i – декартовы координаты; ϑ_x, ϑ_y – усредненные значения вектора скорости воздуха в канале; μ – вязкость среды; f_i – сила конвективного переноса; c – теплоемкость среды; t – температура; λ – теплопроводность воздуха; q_v – мощность внутренних источников тепла; λ_k – теплопроводность кабеля; λ_z – теплопроводность земли; t_0 – температура $t = 20$ °С; β – температурный коэффициент плотности воздуха; g – ускорение свободного падения; ρ_0 – плотность воздуха при $T = 20$ °С; ν – кинематическая вязкость воздуха.

Система дифференциальных уравнений (1)–(6) замыкалась следующими граничными условиями:

- на твердых непроницаемых границах канала и на поверхности кабелей для компонент скоростей задается условие прилипания;

- на поверхности земли задано граничное условие третьего рода по температуре, коэффициент теплоотдачи α с поверхности земли равен $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°С})$, а температура окружающей среды $T_0 = 20$ °С;

- 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.

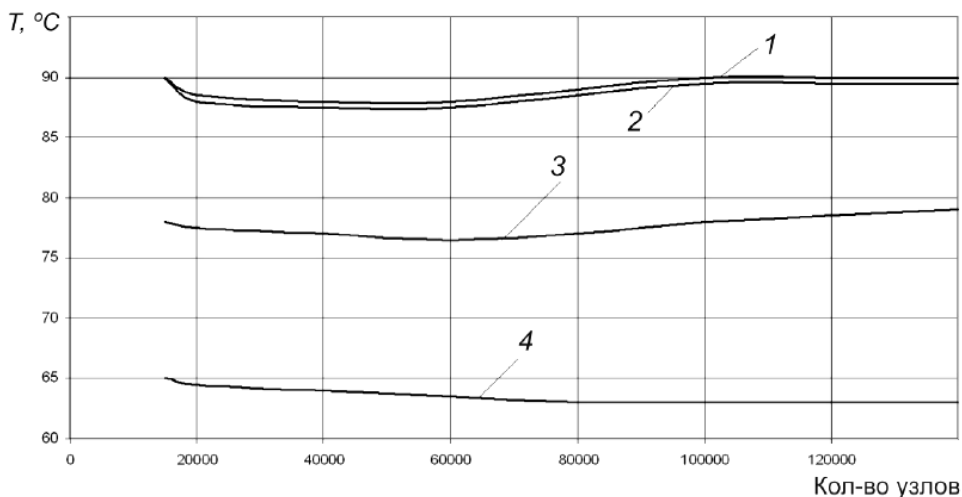


Рис. 2. Зависимость температуры на поверхности кабеля от разбиения на конечные узлы: 1 – первый кабель сверху, 2 – второй кабель, 3 – третий кабель, 4 – четвертый кабель

Поставленная задача (1)–(6) решалась численно методом конечных элементов в среде инженерных расчетов Fluent. Сходимость решения задачи приведена на рис. 2, где представлено изменение температуры на поверхности кабелей от числа узлов. Очевидно, что для получения достоверных результатов (максимальная невязка по температуре не превышает 0,1 %) можно ограничиться 120 000 узлов.

Верификация предложенной модели проведена в работе [4] путем сравнения полученных результатов с результатами, представленными в статье [5]. Различия между результатами не превышали 2 %.

В ряде существующих способов уменьшения температуры в кабельных каналах используют естественную и искусственную вентиляцию. В работе была сделана попытка оценки способа и условий вентилирования на процессы, протекающие в кабельном канале.

Процесс сложного теплообмена в кабельном канале с искусственной и естественной вентиляцией канала рассмотрен в трехмерной постановке (1)–(6).

В результате расчетов получено поле температур в кабельном канале (рис. 3). Из рисунка видно, что температурное поле не симметрично. Максимальная температура на поверхности изоляции составляет 73 °С. Область около кабеля прогрета до 60 °С, причем более прогретыми являются верхние участки над поверхностью кабеля.

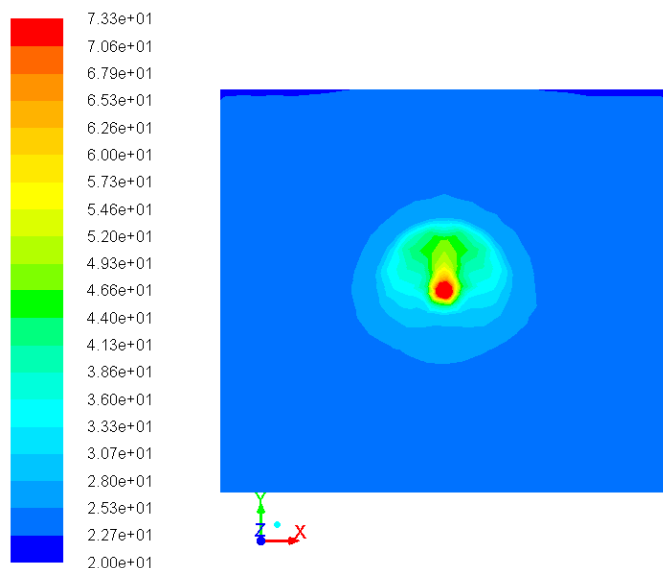


Рис. 3. Температурное поле в трехмерной модели кабельного канала с одним кабелем

Далее было проведено исследование влияния искусственной вентиляции на температурное поле. В отличие от расчетов температурного поля с естественной вентиляцией в случае вынужденной задавалось граничное условие по скорости на входе кабельного канала с учетом расхода воздуха.

На рис. 4 приведена зависимость максимальной температуры изоляции в зависимости от расхода воздуха. Из графика видно, что при увеличении расхода воздуха температура на поверхности изоляции падает. Это обусловлено тем, что теплоотвод увеличивается за счет увеличения скорости движения воздуха. При увеличении расхода воздуха в 10 раз максимальная температура на изоляции падает на 30 °С, что является существенным фактором для определения нагрузочной способности кабельных линий.

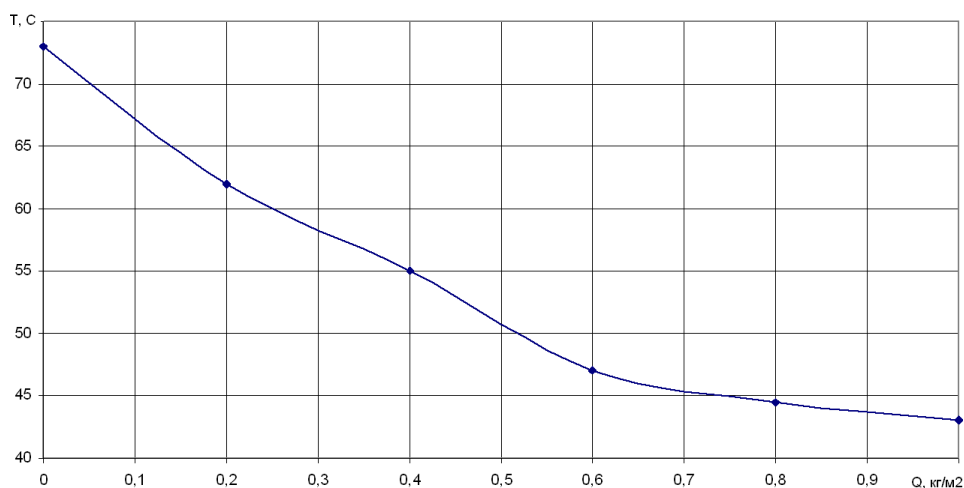


Рис. 4. Зависимость максимальной температуры на изоляции от расхода воздуха

Поскольку бесперебойная работа кабеля ограничивается допустимой температурой на поверхности изоляции, следующим этапом был итерационный подбор мощности кабеля, при которой температура на поверхности изоляции не превысит допустимую, равную 60 °С.

На рис. 5 представлена зависимость мощности кабеля от расхода воздуха.

Таким образом, при использовании искусственной вентиляции можно увеличить пропускную способность до 40 %.

На рис. 6 представлена модель для естественной вентиляции кабельного канала. Геометрические размеры аналогичны предыдущей модели. Раструбы имеют диаметр 10 мм, расстояние между раструбами – 2 м. Вентиляция кабельного канала происходит за счет раструбов, которые выведены на поверхность земли. С их помощью осуществляется смешение воздуха в кабельном канале с воздухом окружающей среды.

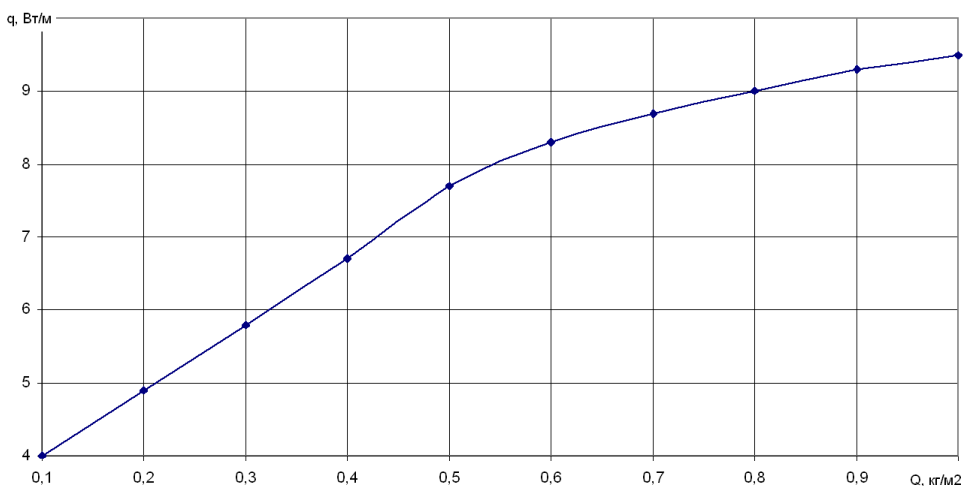


Рис. 5. Зависимость мощности кабеля от расхода воздуха

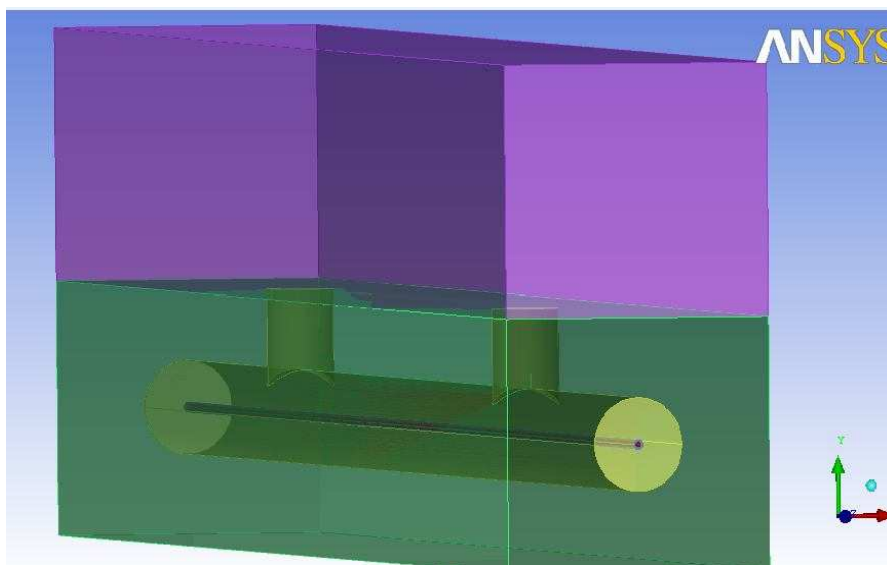


Рис. 6. Модель для естественной вентиляции

На рис. 7 представлено полученное температурное поле в кабельном канале.

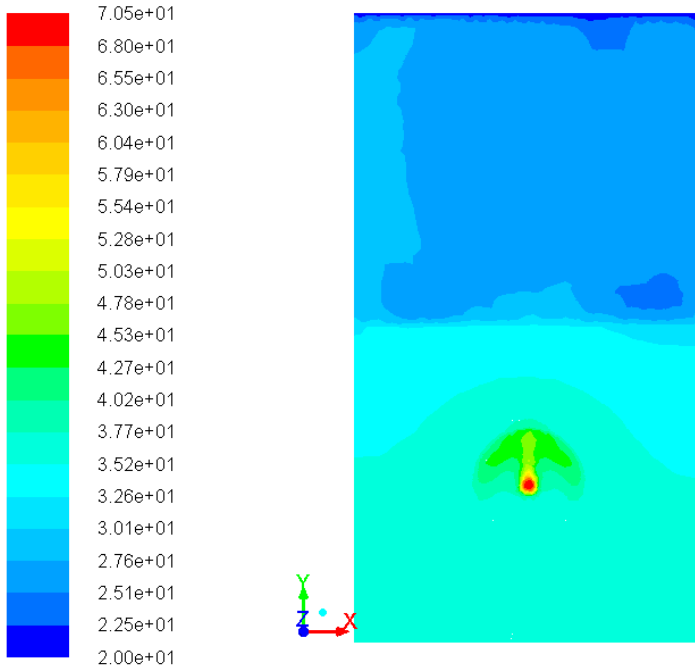


Рис. 7. Температурное поле в кабельном канале при естественной вентиляции

При естественной вентиляции максимальная температура в канале уменьшается на 3 градуса в сравнении с кабельным каналом без вентиляции. Из рис. 7 видно, что окружающий грунт вокруг кабеля имеет температуру ниже примерно на 10 °С, чем в кабельном канале без вентиляции.

Таким образом, влияние вентиляции изменяет картину температурного поля в кабельном канале и его нагрузочную способность.

Режим работы кабельного канала	$T, ^\circ\text{C}$	I, A
Без вентиляции	73	57
Естественная вентиляция	70	71
Искусственная вентиляция	63 при $Q = 0,2 \text{ кг/м}^2$	83

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что создаваемые условия в кабельном канале могут существенно повлиять на нагрузочную способность кабельных линий, а это является определяющим для оптимальной работы кабельных систем в целом.

Библиографический список

1. Определение эксплуатационных характеристик кабелей, проложенных в кабельном канале / А.Г. Щербинин, Н.М. Труфанова, Е.Ю. Навалихина, В.Г. Савченко // Электротехника. – 2011. – № 11. – С. 16–19.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 848 с.
3. Liu C.Y., Mueller W.K., Landis F. Natural convection heat transfer in long horizontal cylindrical annuli // Developments in Heat Transfer. – 1961. – 976.
4. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Исследование конвективного теплообмена в кабельном канале, проложенном в земле // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Сер. Механика. – 2012. – № 1. – С. 93–103.
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).

Получено 05.09.2012