УДК 536.2:532.5

УПРАВЛЕНИЕ ТОКОВОЙ НАГРУЗКОЙ ЛИНИЙ В КАБЕЛЬНОМ КАНАЛЕ С УЧЕТОМ СЛОЖНОГО ТЕПЛООБМЕНА

© 2012 Н.М. Труфанова, Е.Ю. Навалихина

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Поступила в редакцию 21.11.2012

В работе построена математическая модель процесса сложного тепломассобмена в кабельном канале в условиях естественной конвекции. Исследованы температурные поля кабельных линий, расположенных в кабельном канале. Определена величина оптимальной передаваемой мощности и показаны пути управления нагрузочной способности кабельных линий при различных режимах работы.

Ключевые слова: кабельная линия, нагрузочная способность, температурное поле, рабочая температура кабеля, рабочий ток

Рациональное распределение нагрузки по кабельным линиям в кабельном канале является актуальной задачей для любого хозяйственного объекта или мегаполиса. Величина номинальной токовой нагрузки кабелей зависит от ряда факторов: геометрических параметров, теплофизических характеристик окружающей среды, условий теплообмена и многих других [1]. В работе рассматривается задача определения эксплуатационных характеристик силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, проложенных в кабельном канале, при различных режимах нагружения.

Кабельный канал представляет собой бетонный монолит, в котором проложены кабельные линии в полиэтиленовых трубах. Схематичное изображение кабельного канала симметричного по оси ОУ представлено на рис. 1. Все размеры кабельного канала приведены в миллиметрах.

Поскольку передаваемая мощность зависит от температурных условий в каналах, необходимо рассматривать задачу сложного теплообмена при различных условиях работы. Математическая модель движения и теплообмена в канале основывается на законах сохранения массы, количества движения и энергии [2]. Были сделаны следующие допущения: задача стационарная, симметричная относительно оси *оу*, течение ламинарное, теплопроводность материалов постоянная [3]. С учетом сделанных предположений система дифференциальных уравнений, описывающих процессы тепломассопереноса в кабельном канале, имеет следующий вид:

Труфанова Наталия Михайловна, доктор технических наук, профессор. E-mail: ktei@pstu.ru Навалихина Екатерина Юрьевна, аспирантка. E-mail: ekaterinanavalikhina@yandex.ru

Уравнение неразрывности:

$$\mathcal{P}_{i}\frac{\partial\rho}{\partial x_{i}} = \rho \frac{\partial\mathcal{P}_{i}}{\partial x_{i}} \tag{1}$$



Рис. 1. Геометрические размеры кабельного канала

Уравнение движения:

$$\rho \vartheta_{j} \frac{\partial \vartheta_{i}}{\partial x_{j}} = -\frac{\partial p}{\partial x_{i}} + \frac{\partial}{\partial x_{j}} \mu \frac{\partial \vartheta_{i}}{\partial x_{j}} + f_{i}$$

$$f_{x} = 0; f_{y} = \frac{g\beta(T - T_{0})}{\rho}; f_{z} = 0$$

$$(2)$$

Уравнение энергии для воздуха:

$$\rho c \mathcal{G}_{i} \frac{\partial t}{\partial x_{i}} = \frac{\partial}{\partial x_{j}} \lambda \frac{\partial^{2} t}{\partial x_{j}^{2}} + q_{v}$$
(3)

Уравнение теплопроводности для:

- кабельных линий

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\lambda_{\kappa} \frac{\partial t}{\partial x_i}) + \frac{\partial}{\partial y_i} (\lambda_{\kappa} \frac{\partial t}{\partial y_i}) + q_{\nu} = 0$$
(4)

- массива земли

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

где ρ – плотность материала, x_i – декартовые координаты, \mathcal{G}_x , \mathcal{G}_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_{κ} – теплопроводность кабеля, λ_3 –теплопроводность земли, t_0 – температура 20°C; β – температурный коэффициент плотности воздуха; g – ускорение свободного падения; v – кинематическая вязкость воздуха.

Система дифференциальных уравнений (1)-(5) 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 Вт/(м²°С), а температура окружающей среды $T_0 - 20$ °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.



Рис. 2. Конструкция кабеля АПвВнг-LS

Поставленная задача (1)-(5) решалась численно методом конечных элементов в среде инженерных расчетов Fluent. На первом этапе решения поставленной рассматривается процесс сложного теплообмена одной кабельной линии на 35 кВ с алюминиевой жилой и изоляцией из сшитого полиэтилена марки АПвВнг-LS с медным экраном сечением 35 мм², конструкция которого представлена на рис. 2. Кабель расположен в бетонном коробе, проложенном в земле. Внутри канала воздух.

Решение задачи приводилось на различных сетках, число элементов которое изменялось в диапазоне от 50000 до 230000 узлов. По результатам расчета сходимость решения оценивается по значению выхода на прямую температуры на поверхности жилы. Сходимость решения задачи приведена на рис. 2 для кабеля со сложной конструкцией, где представлено изменение температуры на поверхности жилы кабеля. Очевидно, что для получения достоверных результатов (максимальная невязка по температуре не превышает 0,1%) для кабеля со сложной конструкцией можно ограничиться 190000 узлов. На рис. 4 представлено температурное поле в кабельном канале. Из рисунка видно, что максимальная температура жилы составляет 33°С. Более прогретыми являются верхние части кабеля.



Рис. 3. Зависимость температуры на поверхности кабеля с многослойной конструкцией от количества разбиения на конечные узлы



Рис. 4. Температурное поле внутри кабельного канала и кабеля со сложной конструкцией.

Для рационализации счета температурных полей 18 кабельных линий, расположенных в

кабельном канале, многослойная конструкция кабеля заменена однородным полиэтиленовым монолитом с эквивалентной теплопроводностью. Эквивалентная теплопроводность рассчитывается как многослойный цилиндр по следующему выражению[4]:

$$\lambda_{\text{\tiny SKS}} = \frac{\ln(\frac{d_n}{d_1})}{\sum_{1}^{i} \frac{\ln(\frac{d_i}{d_{i-1}})}{\lambda_i}}$$
(6)

где d_i – диаметр *i* слоя кабеля, λ_i – теплопроводность *i* слоя кабеля.

В табл. 1 приведены теплофизические свойства материалов. Сходимость решения задачи с упрощенной моделью приведена на рис. 5.

Таблица 1. Теплофизические свойства материалов

плотность воздуха, кг/м ³	1,000
теплоемкость воздуха, дж/кг.к	1,005
теплопроводность воздуха, вт/м.к	0,0242
теплопроводность бетона и грунта,	0,8
BT/M.K	
теплопроводность эквивалентного	0,258
слоя, вт/м.к	



Рис. 5. Зависимость температуры на поверхности кабеля с эквивалентным слоем от разбиения на конечные узлы

Исходя из графика, температура на поверхности изоляции стабилизируется при количестве разбиения 90000 узлов, что в два раза меньше чем при рассмотрении сложной конструкции кабеля. Это является важным для решения задачи с 18 кабельными линиями. На рис. 6 представлено распределение температуры по поверхности кабеля с эквивалентным слоем.

Из рис. 4 и 6 видно, что температурное поле в кабельном канале и в том и в другом случае идентично. Температура на поверхности кабеля для обоих случаев составила 33°С. Характер распределения температурного поля в кабеле со сложной конструкцией совпадает с распределением температуры в кабеле с эквивалентным слоем. Верхние части кабеля более прогреты, чем снизу. Это связано с движением воздуха в кабельном канале. В дальнейших расчетах используется кабель с эквивалентным слоем для оптимизации счета температурных полей.



Рис. 6. Температурное поле внутри кабельного канала и кабеля с эквивалентным слоем

На втором этапе решена задача определения рациональной величины передаваемой мощности при различных режимах работы кабельных линий. Критерием ограничения по передаваемой мощности является значение максимальной температуры на жиле кабеля, которая не должна превышать допустимой температуры сшитого полиэтилена равного 90°С. На рис. 7 представлено температурное поле в кабельном канале при максимально допустимой нагрузке кабельных линий.



Рис. 7. Температурное поле внутри кабельного канала

По полученным температурным полям можно определить кабели, которые находятся в более жестких температурных условиях. Из рисунка видно, что кабели, расположенные ближе к центральной области канала, более нагреты, чем кабели, расположенные на периферии. Это необходимо учитывать при распределении нагрузки. В табл. 2 приведены результаты расчетов, полученные для различных режимов нагрузки кабельных линий.

Эксплуатационные характеристики	Количество нагру- женных линий		
	6	12	18
суммарная мощность тепловыделения, Вт/м	27,9	35,04	37,8
рабочий ток, А	134	106,6	90,3
передаваемая мощность по одной линии, МВА	8,1	6,46	5,47
суммарная передаваемая мощность в канале, МВА	48,76	81,12	98,46

Таблица 2. Эксплуатационные характеристики кабельных линий

Исходя из результатов, представленных в таблице, появляется возможность оптимизировать передаваемую мощность в зависимости от реальных потребностей. В случае, когда надо передавать максимальную мощность по кабельным линиям на 35 кВ, то отключаем остальные кабельные линии и по кабельным линиям передается рабочий ток 134 А. С другой стороны, если нет особых условий для ограничения работающих линий, то суммарная передаваемая мощность составит 98,46 MBA, а рабочий ток составит 90,3 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1. Щербинин, А.Г. 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.
- Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973. 848 с.
- Навалихина, Е.Ю. Исследование конвективного теплообмена в кабельном канале, проложенном в земле / Е.Ю. Навалихина, Н.М. Труфанова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2012. № 1. С. 93-103.
- 4. *Беляев, Н.М.* Методы теории теплопроводности. Том 1 / *Н.М. Беляев, А.А. Рядно.* – М.: «Высшая школа», 1982. 327 с.

CONTROL OF LINES CURRENT LOADING IN THE CABLE CHANNEL TAKING INTO ACCOUNT THE COMPLEX HEAT EXCHANGE

© 2012 N.M. Trufanova, E.Yu. Navalikhina

Perm National Research Polytechnical University

In work the mathematical model of complex heat and mass exchange process in cable channel in the conditions of natural convection is constructed. Temperature fields of cable lines located in the cable channel are investigated. The size of optimum transferred capacity is defined and ways of control the loading ability of cable lines are shown at various operating modes.

Key words: cable line, loading ability, temperature field, working temperature of a cable, working current

Nataliya Trufanova, Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: ktei@pstu.ru Ekaterina Navalikhina, Post-graduate Student. E-mail: ekaterinanavalikhina@yandex.ru