

УДК 621.315

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В КАБЕЛЬНОМ КАНАЛЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М.

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, e-mail: ekaterinanavalikhina@yandex.ru

В представленной работе построена двумерная математическая модель процессов тепломассообмена в подземном кабельном канале при стационарном режиме работы силовых кабельных линий. Поставленная задача основана на законах сохранения массы, количества движения и энергии, учитывающая тепловое излучение в условиях естественной конвекции. Модель реализована в программном комплексе ANSYS Fluent с помощью метода конечных элементов. В работе приведена верификация предложенной математической модели путем сравнения полученных численных результатов с экспериментальными данными. Численно исследовано влияние климатических условий на реализуемое температурное поле в подземном кабельном канале. Определены величины токовых нагрузок и оптимальной передаваемой мощности при различных режимах нагружения кабельного канала, показаны пути возможного управления токовой нагрузкой силовых кабелей.

Ключевые слова: токовая нагрузка, кабельный канал, управление пропускной способностью, температурное поле, эксплуатационные характеристики силового кабеля

COMPUTER MODEL PROCESS HEAT CABLE DUCTS UNDER DIFFERENT OPERATING CABLE LINES

Navalikhina E.Y., Trufanova N.M.

Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: ekaterinanavalikhina@yandex.ru

In the present paper we construct a two-dimensional mathematical model of heat and mass transfer processes in the underground conduit at steady-state operation of power cable lines. The task is based on the laws of conservation of mass, momentum and energy, taking into account the thermal radiation in conditions of natural convection. The model is implemented in the software package ANSYS Fluent using the finite element method. The paper contains the verification of the proposed mathematical model by comparing the numerical results with experimental data. Numerically investigated the influence of climatic conditions on the realized temperature field in an underground conduit. The values of current loads and optimum transmission power under different loading conditions of the cable channel shows a possible way control current load power cables.

Keywords: current load, the cable channel, bandwidth control, temperature field, the performance of the power cable

Оценка максимального допустимого тока высоковольтных силовых кабелей, проложенных в подземном кабельном канале, является важной задачей в сфере любых подземных разработок проектирования электрических сетей. На сегодняшний день электроэнергетика ожидает от подземных сетей высочайшую надежность и эффективную передачу электроэнергии.

В работе рассмотрена задача процессов тепломассообмена в кабельном канале. Исследуемый кабельный канал представляет собой бетонный монолит, находящийся на глубине одного метра от поверхности земли, в котором проложены трубы из полиэтилена с силовыми кабелями (рис. 1).

Пропускная способность кабельных линий напрямую зависит от температурного поля в кабельном канале. Для определения температурного поля необходимо решать задачу сложного тепломассообмена. Математическая модель движения и тепломассообмена в канале основывается на законах сохранения массы, количества движения и энергии [2, 6–7].

В зависимости от геометрии канала, передаваемой мощности и условий теплообмена в кабельном канале могут реализовываться различные режимы движения воздуха. Режим движения воздуха в кабельном канале существенно влияет на температуру и в конечном итоге на пропускную способность кабелей. Выбор того или иного режима движения воздуха можно оценивать по критерию Рейнольдса [1]. Для рассматриваемой геометрии канала и условий теплообмена расчетный критерий Рейнольдса не превышает 600 единиц. В этом случае естественным было бы предположить, что реализуется ламинарное движение воздуха в канале. Были сделаны следующие допущения: задача стационарная, движение воздушного потока ламинарное; теплофизические характеристики материалов постоянны; сложная конструкция конструктивных элементов кабеля заменена однородным слоем из полиэтилена с эквивалентными свойствами.

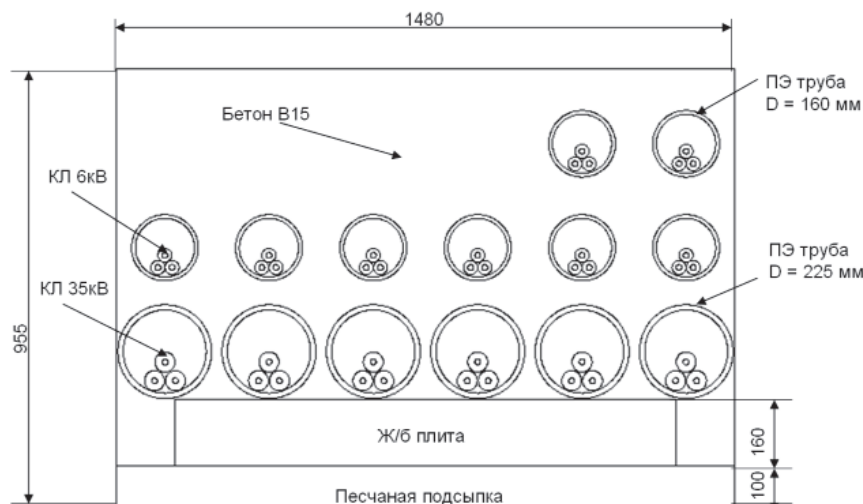


Рис. 1. Конструктивные элементы кабельного канала и используемые материалы

Система дифференциальных уравнений, описывающая процессы тепломассообмена в условиях естественной конвекции, имеют вид [3]:

Уравнение неразрывности:

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

Уравнение движения:

$$\rho_v \vartheta_j \frac{\partial \vartheta_i}{\partial x_j} = -\mu \Delta \vartheta_i + f_i. \quad (2)$$

Уравнение энергии для воздуха:

$$\rho_v c \vartheta_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \lambda \Delta T + q_v. \quad (3)$$

Уравнение теплопроводности для кабельных линий:

$$\lambda_k \Delta T + q_v = c \rho \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (4)$$

Уравнение теплопроводности земли:

$$\lambda_3 \Delta T = \rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (5)$$

Плотность воздуха зависит от температуры по закону Буссинеска [8]:

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

где ρ – плотность материала; ρ_v – плотность воздуха (в зависимости от температуры); x_i – декартовы координаты; ϑ_i – компоненты вектора скорости воздуха в канале; f_i – сила конвективного переноса; c – теплоемкость среды; T – температура; λ – теплопрово-

дность воздуха; q_v – мощность внутренних источников тепла; λ_k – теплопроводность конструктивных элементов кабельного канала; λ_3 – теплопроводность земли; μ – динамическая вязкость воздуха.

Конвективный теплообмен между кабелями и стенками полиэтиленовой трубы дополняется теплообменом излучением.

Система уравнений (1)–(6) замыкалась следующими граничными условиями: на твердых непроницаемых границах канала и на поверхности кабелей для компонент скоростей воздуха задается условие прилипания и непроникновения; на поверхности земли задано граничное условие третьего рода; на трех других границах в массиве земли заданы адиабатические условия теплообмена; на границах контакта разнородных сред задавались граничные условия четвертого рода.

Поставленная задача решалась с помощью метода конечных элементов [4, 5].

Для проверки адекватности предложенной модели были произведены численные расчеты методом конечных элементов и произведено сравнение с натурными данными.

Для исследуемого кабельного канала были сделаны натурные измерения, которые проводились с помощью бесконтактного пирометра ТКА.

В табл. 1 приведены условия, при которых происходили замеры температуры в кабельном канале.

В результате решения поставленной задачи было получено температурное поле в кабельном канале. На рис. 2 показан увеличенный масштаб кабельной линии, находящейся под токовой нагрузкой. Рабочий ток одного кабеля составляет 107 А.

Таблица 1

Время, число, месяц, год	11 часов, 05.07.2012, ясная погода
Температура грунта, °C	15
Температура воздуха, °C	26
Токовая нагрузка одной кабельной линии, А	107
Токовая нагрузка второй кабельной линии, А	13
Температура первой кабельной линии, °C	25,7
Температура воздуха в первой трубе, °C	23,0
Температура второй кабельной линии, °C	22,0
Температура воздуха во второй трубе, °C	21,3

Максимальная температура на поверхности первой кабельной линии составляет 26,4°C, температура воздуха в трубе 23,4°C. Для второй кабельной линии 21,6 и 21,2°C соответственно. Расхождение с табл. 1 составило не более 5%. Этой погрешностью можно пренебречь в силу масштабности поставленной задачи.

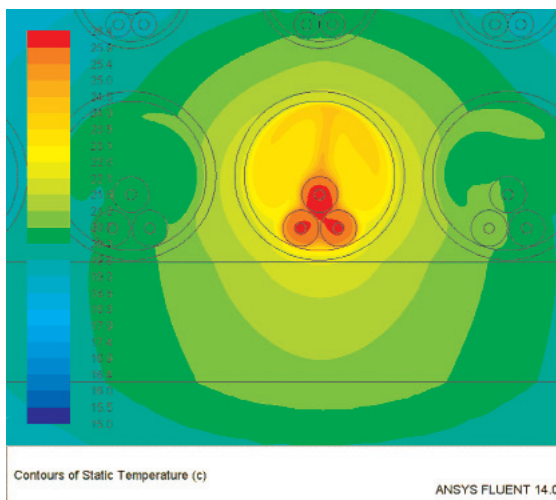


Рис. 2. Температурное поле кабельной линии

Управление нагрузочной способностью кабельных линий в зависимости от режимов нагружения

Представлены картины распределения температурных полей при различных режимах нагрузки кабельных линий после решения поставленной задачи.

На рис. 3 представлено температурное поле в кабельном канале и в массиве земли при максимально допустимых нагрузках кабелей для данных условий прокладки и работы кабельных линий.

По полученному температурному полю можно определить кабельные линии, находящиеся в более жестких температурных условиях. Видно, что кабели, расположенные ближе к центральной области канала, более нагреты, чем кабели, расположенные на периферии. Это необходимо учитывать при распределении нагрузки по каналу. Максимальная температура не превышает допустимой температуры для данных условий прокладки.

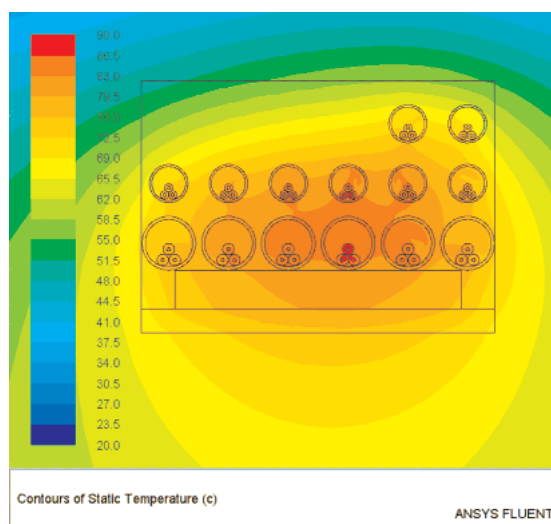


Рис. 3. Температурное поле кабельного канала при работе всех кабельных линий

Таблица 2

Эксплуатационные характеристики кабелей при различных режимах нагружения

Эксплуатационные характеристики		Количество работающих кабельных линий			
		1	6	8	14
$T_{\max}$, °C		90	90	90	90
Рабочий ток, А		274	134,4	127	115,7
Передаваемая мощность по одной линии, МВА	На 6 кВ	—	—	1,32	9,62
	На 35 кВ	16,6	8,14	—	42,1
Суммарная передаваемая мощность в канале, МВА		16,6	48,9	10,6	51,72

В табл. 2 сведены результаты расчетов по определению эксплуатационных характеристик кабельных линий при различных режимах нагружения. Данные рекомендации по значениям токовых нагрузок полностью соответствуют критерию непревышения максимальной допустимой температуры, равной для данного типа изоляции 90°C , которая реализуется в кабельном канале.

Исходя из результатов, представленных в табл. 2 видно, что в случае если необходимо передавать максимальную мощность по кабельным линиям на 35 кВ, отключаем кабельные линии на 6 кВ и увеличиваем рабочий ток на 16%. Если в случае когда кабельный канал нагружен до максимальной нагрузки и рабочий ток всех кабельных линий равен 115,7 А, то при работе только кабельных линий на 35 кВ рабочий ток уже

составит 134,4 А, а суммарная передаваемая мощность будет равна 48,9 МВА.

Управление нагрузочной способностью кабельных линий в зависимости от климатических условий

В наше время актуальной является проблема загруженности кабельных линий. Особую роль играют влияния климатических факторов, таких как, например, температура поверхности земли. В зимнее время возникает потребность увеличения нагрузки на кабель, которую можно обосновать, проведя исследование влияния климатических условий на температурное поле в канале и соответствующего выбора уровня передаваемой мощности.

На рис. 4 представлен график зависимости максимальной температуры в кабельном канале от температуры грунта при работе всех кабельных линий.

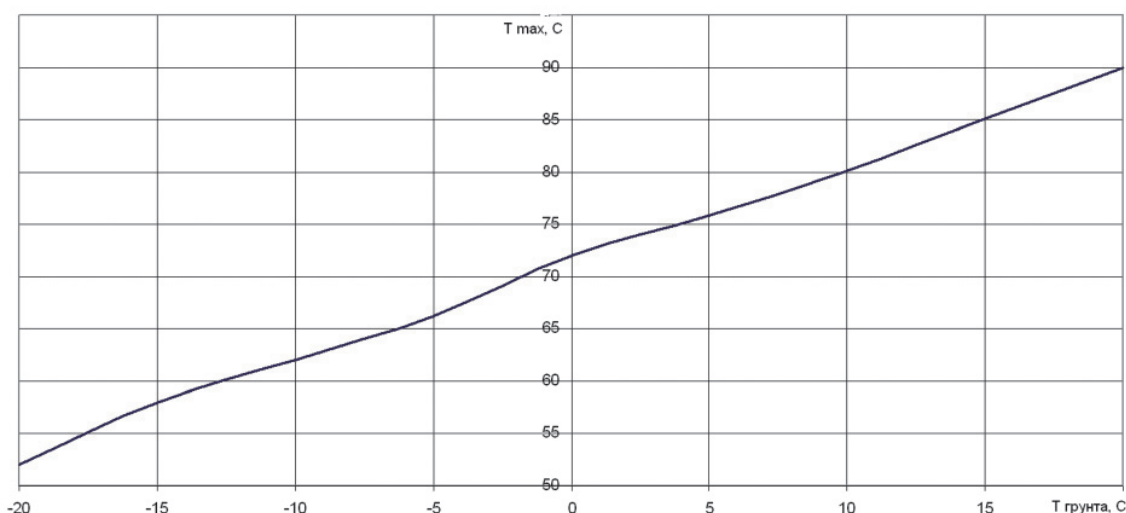


Рис. 4. Зависимость максимальной температуры в кабельном канале от температуры окружающего грунта

За основу взяты расчеты по определению температуры в кабельном канале при допустимой нагрузке всех кабелей. Температура грунта составляет 20°C , а рабочий ток для кабельных линий равен 115,7 А. Из рис. 4 видно, что при уменьшении температуры грунта температура в кабельном канале уменьшается. Данное понижение температуры дает возможность увеличить пропускную способность кабельных линий в зимнее время года, когда потребности потребителей растут. Для оптимизации передаваемой мощности по кабельным линиям в зависимости от климатических условий

была осуществлена итерационная процедура по подбору рабочего тока для диапазона температур поверхности таким образом, чтобы температура изоляции не превышала допустимой температуры сшитого полиэтилена. В табл. 3 приведены эксплуатационные характеристики кабельного канала для различных температурных условий окружающего грунта. Также приведены рекомендуемые максимально допустимые токовые нагрузки в зависимости от температурных условий окружающего грунта.

Данные рекомендации актуальны при работе всех кабельных линий.

Таблица 3

Эксплуатационные характеристики кабельного канала

Эксплуатационные характеристики	Температура окружающего грунта, °С								
	-20	-15	-10	-5	0	+5	+10	+15	+20
Максимальная температура в канале, °С	52	58	62	66	72,2	75,8	80	85	90
Рабочий ток кабельных линий, А	115,7	115,7	115,7	115,7	115,7	115,7	115,7	115,7	115,7
Допустимый рабочий ток (Температура в канале 90°С)	140,7	136,6	133,3	130,4	127,7	125,3	122,8	119,5	115,7
Увеличение нагрузочной способности, %	21,7	18,1	15,3	12,8	10,3	8,3	6,1	3,3	0
Суммарная передаваемая мощность, МВА	62,9	61,1	59,6	58,2	57,07	55,94	54,89	53,39	51,72

Исходя из результатов, представленных в табл. 3, видно, что в зимнее время года, когда грунт охлаждается до отрицательной температуры, появляется возможность увеличивать токовую нагрузку до 20 % и тем самым повысить значение суммарной передаваемой мощности на 21 %. Все полученные результаты позволяют оперативно оценить максимальную пропускную способность кабельных линий по заданным условиям, спроектировать новую линию «с нуля» или модернизировать старую.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-08-96034).

Список литературы

1. Бредшоу П. Введение в турбулентность и ее измерение. – М.: Мир, 1974. – 279 с.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 848 с.
3. Навалихина Е.Ю., Труфанова Н.М. Управление токовой нагрузкой линий в кабельном канале с учетом сложного теплообмена // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 4(5). – С. 1318–1321.
4. Патанкар С.В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах – Computation of conduction and Duct Flow Heat Transfer: пер. с англ. — М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 312 с.
5. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
6. Седов Л.И. Механика сплошной среды: в 2 т. Т. 1. – М.: Наука, 1983. – 528 с.
7. Седов Л.И. Механика сплошной среды: в 2 т. Т. 2. – М.: Наука, 1984. – 560 с.
8. Yang Liu, Nhan Phan-Thien, Ronald Kemp. Coupled conduction – convection problem for an underground duct containing eight insulated cables // International Journal of Computational Engineering Science. 2000. Vol. 1. № 2. P. 187–206.

References

1. Bradshaw P. Vvedenie v turbulentnost i ee izmerenie [Introduction to turbulence and its measurement]. Moscow, Mir, 1974. 279 p.
2. Loitsyansky L.G. Mekhanika zhidkosti i gaza [Fluid Mechanics]. Moscow, Nauka, 1973. 848 p.
3. Navalikhina E.Yu, Trufanova N.M. Upravlenie tokovoi nagruzkoi linii v kabelnom kanale s uchetom slozhnogo teploobmena [Management current load lines in the cable channel, given the complex heat]. Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiiskoi akademii nauk, 2012, Vol. 12, no 4(5), pp. 1318–1321.
4. Patankar S.V. Chislenoe reshenie zadach teploprovodnosti i konvektivnogo teploobmena pri techenii v kanalakh [Computation of conduction and Duct Flow Heat Transfer]. Moscow, Izdatelstvo MEI, 2003. 312 p.
5. Segerlind L. Primenenie metoda konechnykh elementov [Application of finite element method]. Moscow, Mir, 1979. 392 p.
6. Sedov L.I. Mekhanika sploshnoi sredy [Continuum Mechanics]. Vol. 1, Moscow, Nauka, 1983. 528 p.
7. Sedov L.I. Mekhanika sploshnoi sredy [Continuum Mechanics]. Vol. 2, Moscow, Nauka, 1984. 560 p.
8. Yang Liu, Nhan Phan-Thien, Ronald Kemp. Coupled conduction – convection problem for an underground duct containing eight insulated cables // International Journal of Computational Engineering Science. 2000. Vol. 1. no. 2. pp. 187–206.

Рецензенты:

Щербинин А.Г., д.т.н., профессор кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь;

Бочкарев С.В., д.т.н., профессор кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь.

Работа поступила в редакцию 15.07.2014.