

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ВОЗДУШНЫХ СООРУЖЕНИЯХ С СВЕРХВЫСОКОВОЛЬТНЫМИ КАБЕЛЯМИ

И.Н. Кучерявая, канд. техн. наук

Ин-т электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Исследованы тепловые процессы в подземных воздушных кабельных сооружениях. На макроуровне найдено распределение температуры в элементах кабелей с учетом свободно-конвективного движения воздуха в туннеле и кабельном канале. На микроуровне решена электротепловая задача в газовом включении в микроструктуре полиэтиленовой изоляции при частичном разряде и в его отсутствии. Найдено возможное повышение температуры в локальных зонах повреждения изоляции. Библ. 14, рис. 4, таблица.

Ключевые слова: сверхвысоковольтные кабели, неизотермическое движение воздуха, газовые включения в изоляции, частичный разряд, многомасштабное моделирование.

В настоящее время в Украине выпускаются и используются кабели высокого (до 110 кВ) и сверхвысокого (220 и 330 кВ) напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена [6, 8, 12]. Промышленное производство таких кабелей освоено на заводе "Южкабель" (г. Харьков).

Кабели сверхвысокого напряжения прокладываются в грунте как в траншеях, так и в специальных воздушных сооружениях при обеспечении защиты от механических повреждений [10, 14].

Надежным способом прокладки кабельных линий особенно в черте города, на территории промышленных предприятий и электростанций является туннельная прокладка. Как правило, в туннелях круглого сечения кабели прокладываются вертикально вдоль стен (рис. 1 а) [14]. Такая прокладка наиболее экономна и сохраняет много места в ограниченном пространстве туннеля, облегчает обслуживание кабелей, а также обеспечивает более низкую температуру нагрева токопроводящих жил по сравнению с горизонтальной прокладкой кабельных линий [4].

В работе [13] расчетным путем показано, что вертикальная прокладка сверхвысоковольтных (220 и 500 кВ) кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена и с токопроводящей жилой большого сечения (2500 мм²) является наиболее оптимальным расположением кабелей для круглого туннеля.

В случае необходимости прокладки кабельной трассы на пересечении с железными и автомобильными дорогами используются замкнутые каналы, заглубленные в грунт. Кабели в воздушных каналах могут располагаться на дне канала или на специальных полках для лучшего охлаждения. На рис. 1 б показан кабельный колодец воздушного канала с расположением сверхвысоковольтных кабелей на дне [10]. Как правило, средства искусственной вентиляции для кабельных каналов, в отличие от туннелей, не предусматриваются.

В ходе эксплуатации кабели в воздушных сооружениях нагреваются. В замкнутом пространстве кабельных сооружений протекают процессы теплопереноса и свободно-конвективной циркуляции воздуха. Поле скоростей воздуха и температурное поле в кабельных воздушных сооружениях тесно связаны между собой [1].

В настоящей работе использован метод многомасштабного моделирования [7] для исследования тепловых процессов в кабельных сооружениях с сверхвысоковольтными кабельными линиями. В линиях рассматриваются кабели одножильного исполнения с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 330 кВ [6].

На макроуровне учитываются условия прокладки кабелей и их конструктивное исполнение. Проводится расчет температурного поля кабелей, проложенных в воздушных туннеле и канале, с учетом неизотермического движения в них воздуха.

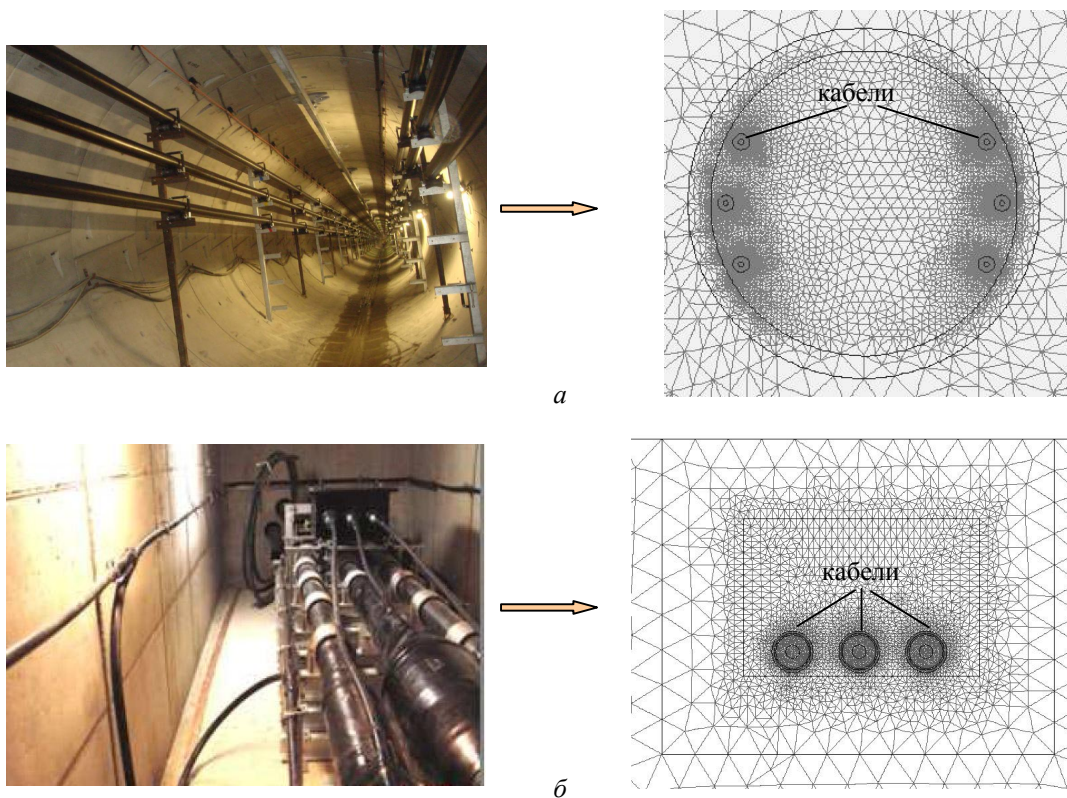


Рис. 1

При решении задачи на *микроуровне* учитывается фактор качества изоляционного материала и то, что тепловая деструкция полиэтилена наступает из-за наличия в изоляции пустот и газовых включений (со средними размерами 10...20 мкм) и вследствие ускорения химических реакций на микрометровом масштабе даже при рабочих температурах – 60...130 °С. Это приводит к постепенному изменению на микроуровне структуры и прочностных свойств полиэтиленового материала.

Решение тепловой задачи на микроуровне дополняет решение задачи на макроуровне. Определяется температура жил и изоляции кабелей с целью уточненного выбора значений длительно допустимых токовых нагрузок.

Решение задач проведено численно в программе Comsol [11] с использованием метода конечных элементов. Работа выполнена с учетом опыта расчета тепловых процессов в туннелях с кабелями на напряжение 110 кВ [4] и результатов, изложенных в [2, 3, 8].

Тепловая задача на макроуровне. *Математическая модель и ее реализация.* Рассматривается неизотермическое движение воздуха в заглубленных в грунт кабельных воздушных сооружениях – туннеле и канале, показанных на рис. 1 *а* и *б* соответственно. Воздух считается идеальным газом в случае относительно малой скорости движения и низкого давления.

Модель строится для анализа свободно-конвективного процесса движения воздуха и распределения температуры в стационарном режиме при условии постоянной токовой нагрузки кабелей. Возможные на практике сужения и расширения кабельных сооружений, как и изменение рельефа их стенок не учитываются. Грунт вокруг сооружений предполагается однородным, с известными и неизменными по глубине тепловыми свойствами и температурой. Условия работы силовых кабелей считаются одинаковыми на всем протяжении достаточно длинной трассы прокладки.

Принятые допущения позволяют провести формулировку задачи для двумерного случая в декартовой системе координат и рассматривать поперечное сечение кабельных сооружений (рис. 1, справа).

Исследуемые процессы движения воздуха и распределения температуры описываются совместными уравнениями [5, 9]:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \eta(\nabla\mathbf{u} + (\nabla \cdot \mathbf{u})^T) - (2\eta/3)(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I}] + \mathbf{F}; \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0; \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (-\lambda \nabla T + \rho C_p T \mathbf{u}) = Q. \quad (3)$$

Уравнение (1) представляет собой основное уравнение механики газа – уравнение Навье-Стокса; (2) – уравнение неразрывности; (3) – уравнение, описывающее процессы теплопроводности и конвекции тепла в области.

Неизвестными в системе (1)...(3) являются: \mathbf{u} – вектор скорости; p – давление и T – температура. В системе: η – динамическая вязкость воздуха; ρ – плотность воздуха; λ – теплопроводность материала соответствующего элемента рассматриваемой неоднородной области; C_p – теплоемкость воздуха в кабельном сооружении; Q – плотность мощности тепловых источников в области; \mathbf{F} – объемная сила, под действием которой движется воздух; она называется гравитационной подъемной силой и определяется в данном случае согласно работе [9] как

$$\mathbf{F} = (F_x; F_y) = (0; (\rho_\infty - \rho)g), \quad (4)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; ρ_∞ – плотность воздуха на достаточно большом расстоянии от кабелей.

С изменением температуры изменяются давление и плотность воздуха, что описывается соотношением Буссинеска [9]:

$$\rho = \rho_\infty \left(1 - \frac{T - T_\infty}{T_\infty}\right). \quad (5)$$

Здесь T_∞ – температура окружающей среды на значительном удалении от кабелей.

Соотношение (5) выбрано в связи с тем, что уравнение состояния идеального газа ($p = \rho RT$) с дополнительной величиной давления дает плохую устойчивость расчета.

Отметим, что в работе для кабельного туннеля в качестве источников тепла учитываются потери в жилах кабелей, а для воздушного канала источниками нагрева являются: электрические токи, протекающие по металлическим элементам кабелей, – ток в алюминиевой жиле кабеля и вихревой ток в экране из медных проволок. Как показали предварительные расчеты, потери в полиэтиленовой изоляции малы, их вклад в нагрев кабелей не учитывается и величина Q определяется выражением

$$Q = \begin{cases} J_{жс}^2 / \sigma_{жс} & \text{в жилах;} \\ J_{э}^2 / \sigma_{э} & \text{в экранах;} \\ 0 & \text{в остальных элементах,} \end{cases} \quad (6)$$

где $J_{жс}$, $J_{э}$ – действующие значения плотности тока в жилах и наведенного тока в экранах кабелей соответственно; $\sigma_{жс}$, $\sigma_{э}$ – электропроводность жил и экранов.

Уравнения (1)...(5) дополняются граничными условиями для теплового уравнения, решаемого в области с учетом наличия грунта вокруг сооружений:

$$T = T_0 \text{ – в земле,}$$

$$-\lambda \partial T / \partial n = \alpha(T - T_{окр}) \text{ – на поверхности земли.} \quad (7)$$

Здесь T_0 – температура грунта; $T_{окр}$ – температура воздуха над поверхностью земли; α – коэффициент теплоотдачи с поверхности земли в воздух; \mathbf{n} – единичный вектор внешней нормали к границе.

Для газодинамической задачи задаются симметричные граничные условия на твердых стенках. Такие условия принято использовать в задачах гидродинамики как условия непротекания.

Математическая модель неизоотермического процесса движения воздуха включает систему уравнений (1)...(3), выражения (4)...(6), граничные условия (7) и начальные условия для областей воздушных сооружений: $\mathbf{u} = 0$; $p = const$; $T = T_0$, где T_0 – начальная температура воздуха.

Математическая модель реализовывалась численно в программе Comsol [11] методом конечных элементов. Разбиение областей рассматриваемых воздушных сооружений на сеточные элементы показано на рис. 1 справа. Теплофизические характеристики материалов и сред (C_p , λ) принимались независимыми от температуры. Динамическая вязкость воздуха η также считалась постоянной величиной. Расчет газодинамической задачи проводился итерационно, начиная с более высоких значений вязкости, при задании каждый раз найденного решения в качестве начального значения для последующей задачи, и заканчивая малыми значениями (например, для кабельного канала $\eta_{эф} = 5 \cdot 10^{-4}$ Па·с). Отметим, что в расчетах важным было сгущение конечно-элементной сетки в зонах наибольших значений скорости и чисел Рейнольдса. Относительная погрешность решения совместных нелинейных газодинамической и тепловой задач задавалась равной 10^{-3} .

Результаты компьютерных расчетов. Исследуемые варианты прокладки кабелей в подземных воздушных сооружениях показаны на рис. 1. Рассматривались одножильные силовые кабели $800 \text{ мм}^2 / 330 \text{ кВ}$ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Основные характеристики кабелей и данные для компьютерных расчетов приведены в таблице. Ток в экранах по результатам предварительных оценок связан с током в жилах кабелей соотношением $I_э = 0,06I_{ж}$.

| <i>Основные характеристики кабелей</i> | |
|--|-----------|
| Площадь сечения жилы, мм^2 | 800 |
| Площадь сечения экрана, мм^2 | 150 |
| Толщина изоляции, мм | 23,5 |
| Толщина наружной оболочки, мм | 6 |
| Наружный диаметр, мм | 105 |
| <i>Геометрические размеры</i> | |
| Диаметр жилы, мм | 34,8 |
| Внутренний радиус внешнего экрана, мм | 42,8 |
| Глубина прокладки воздушных сооружений в земле, м | 1,5 |
| Внутренний радиус туннеля, м | 1 |
| Толщина бетонных стенок туннеля, м | 0,15 |
| Размеры воздушного канала (внутреннего окна), м | 0,6 x 0,4 |
| Толщина бетонных стенок канала, м | 0,4 |
| Размеры расчетной области с учетом грунта, м: | |
| – для туннеля | 26 x 14 |
| – для канала | 24,5 x 13 |
| <i>Электрические характеристики</i> | |
| Номинальное напряжение сети, кВ | 330 |
| Ток в жилах кабелей в туннеле, А | 580 |
| Ток в жилах кабелей в канале, А | 480 |
| <i>Тепловые характеристики</i> | |
| Допустимая температура основной изоляции, $^{\circ}\text{C}$, в режиме: | |
| – нормальном | 90 |
| – перегрузки | 105 |
| – короткого замыкания | 250 |
| Допустимая температура экрана, $^{\circ}\text{C}$, в режиме: | |

| | |
|---|------|
| – нормальном | 80 |
| – перегрузки | 90 |
| – короткого замыкания | 350 |
| Теплопроводность основной изоляции, Вт/(К·м) | 0,29 |
| Теплопроводность наружной оболочки, Вт/(К·м) | 0,29 |
| Теплопроводность грунта вокруг сооружения, Вт/(К·м) | 1 |
| Температура грунта вокруг сооружения, °С | 15 |
| Температура воздуха в сооружении и над поверхностью земли, °С | 20 |

Результаты расчета теплового поля в кабельных сооружениях двух вариантов представлены на рис. 2. Здесь распределение температурного поля показано в оттенках серого цвета для кабелей в туннеле (рис. 2 а) и для воздушного канала (рис. 2 б). Справа показано распределение температуры вдоль указанных линий, проходящих через центр кабелей. Наиболее нагретыми кабелями в туннели являются верхние кабели, а в канале – кабель, расположенный в центре. Температура нагрева изоляции составляет 80...86 °С. Для выбранных токовых нагрузок температура жил и изоляции кабелей не превышает длительно допустимую (см. таблицу).

На рис. 3 показаны полученные в результате решения совместных тепловой и газодинамической задач (1)...(3) распределения поля скоростей (в оттенках серого цвета) и вектора скорости (стрелками) в туннеле (а) и воздушном канале (б) с кабелями. Для двух вариантов наблюдается симметричная циркуляция воздуха двухвихревой структуры.

Электротепловая задача на микроуровне. При эксплуатации силовых кабелей сверхвысокого напряжения должны быть предусмотрены меры, снижающие темпы старения изоляционного материала. Изменение свойств изоляции и уменьшение ее электрической прочности происходят за счет воздействия электрического и теплового полей. Увеличение напряженности электрического поля и рост температуры имеют место в местах повреждения

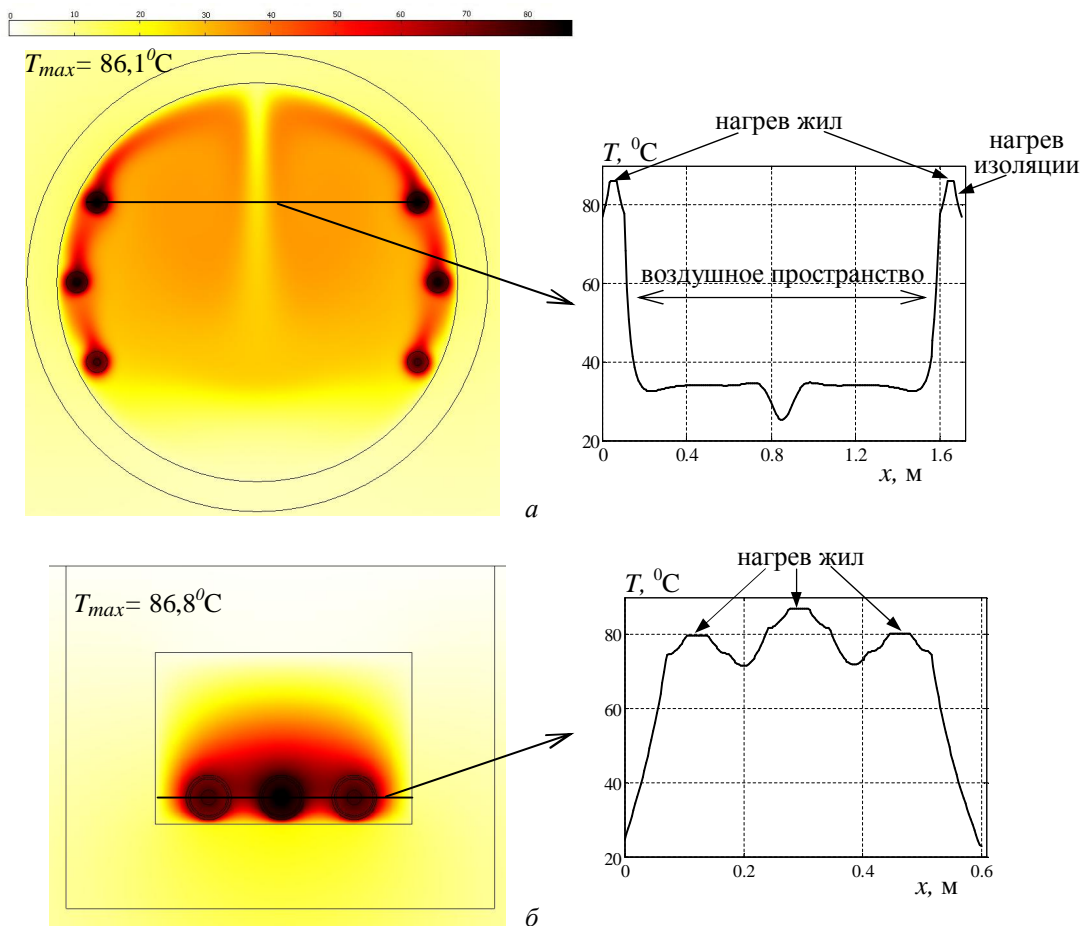


Рис. 2

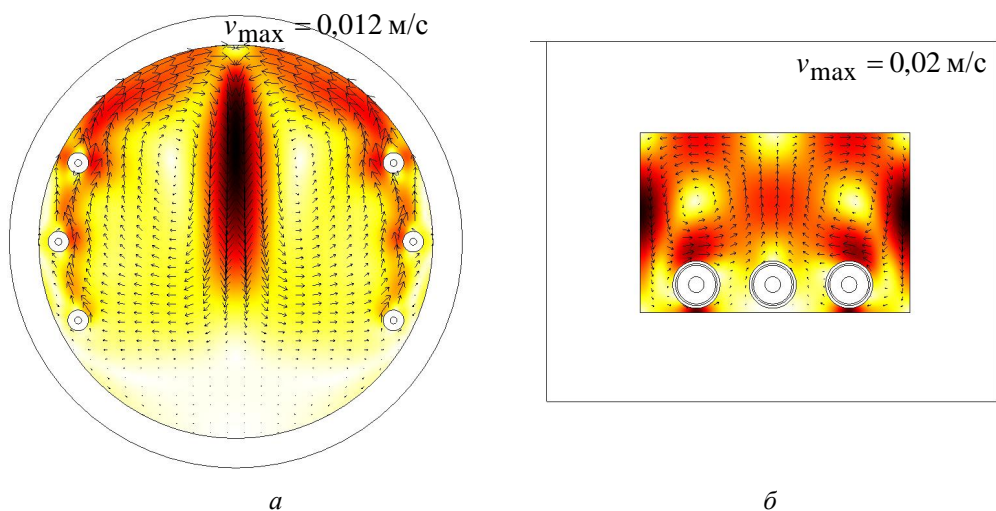


Рис. 3

изоляции, в том числе в местах расположения газовых включений, где при таких условиях могут возникать частичные разряды.

Предположим, что изоляция, которая не имеет сторонних зарядов и находится в переменном электрическом поле, содержит включение сферической формы, заполненное воздухом. Тогда электротепловые процессы в такой изоляции определяются уравнениями

$$\nabla \cdot [-\sigma \nabla \varphi - \varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \frac{\partial \varphi}{\partial t}] = 0; \quad (8)$$

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = Q_m, \quad (9)$$

где φ – электрический потенциал; T – температура; σ – электропроводность среды; ε_r – диэлектрическая проницаемость материала (относительное значение); $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума; ρ , C , λ – соответственно плотность, теплоемкость и теплопроводность среды; Q_m – мощность теплового источника в единице объема на микроуровне, равная

$$Q_m = \begin{cases} \sigma_g |\mathbf{E}|^2 & \text{во включении,} \\ 0 & \text{в области чистой изоляции,} \end{cases} \quad (10)$$

где $\mathbf{E} = -\nabla \varphi$ – напряженность электрического поля; σ_g – электропроводность включения, с помощью которой моделируется наличие частичного разряда во включении путем задания ее следующим образом:

$$\sigma_g(t) = \begin{cases} \sigma_a + \sigma_{\max} \sin(\pi t / \tau) & \text{при } t < \tau, \\ \sigma_a & \text{при } t \geq \tau, \end{cases} \quad (11)$$

где τ – длительность изменения электропроводности (частичного разряда); σ_a – электропроводность воздуха во включении; σ_{\max} – значение электропроводности, характерное для включения определенного размера.

Изменяющаяся во времени электропроводность σ_g характеризует разрядный процесс в воздушном включении.

Задача (8), (9) с учетом (10), (11) решается в двумерной постановке в цилиндрической системе координат для фрагмента изоляции с воздушным включением (рис. 4 а).

На рис. 4 а показаны расчетная область задачи на микроуровне с граничными условиями и ее конечно-элементное разбиение. Здесь OC – ось симметрии. Значение температу-

ры T_p для наиболее нагретых кабелей в воздушном туннеле и канале принимает значение $86\text{ }^{\circ}\text{C}$ согласно данным рис. 2.

На рис. 4 б показано изменение температуры по радиусу воздушного включения AB при частичном разряде ($\Delta T_{\max} = 4,04\text{ }^{\circ}\text{C}$ – кривая 1) и без разряда ($\Delta T_{\max} = 0,97\text{ }^{\circ}\text{C}$ – кривая 2). Справа приведено распределение установившегося температурного поля (в оттенках серого цвета) и векторов теплового потока (стрелками) в области включения (б) для этих двух случаев.

Таким образом, при частичном разряде температура во включении для рассматриваемого случая может достигать предельно допустимых значений (см. таблицу), а при повыше-

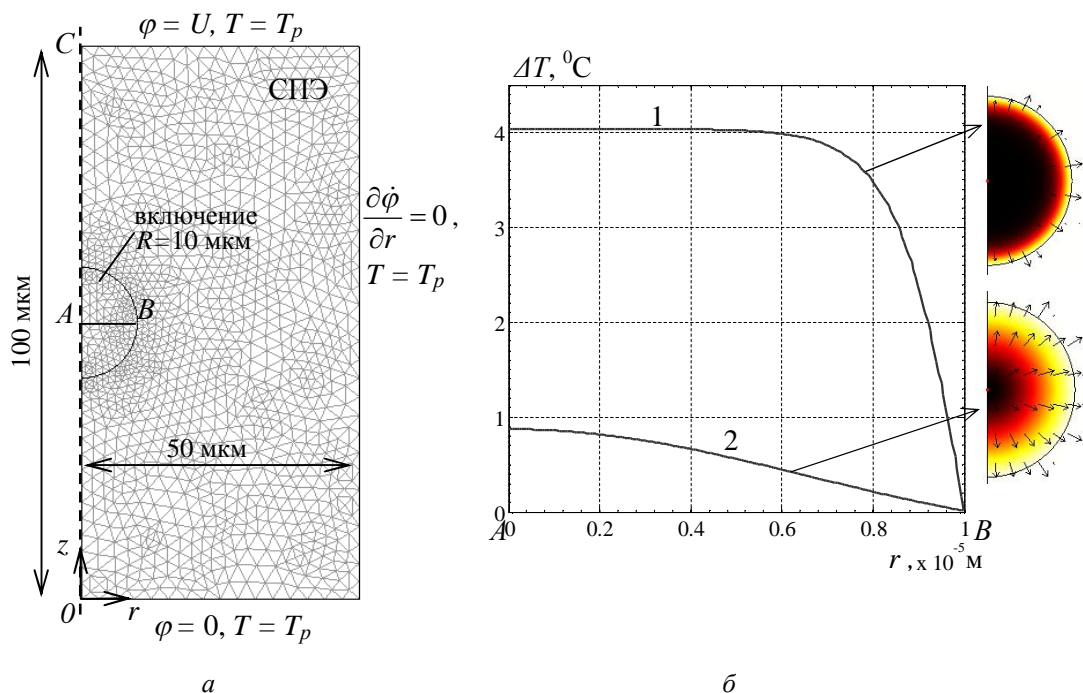


Рис. 4

нии токовой нагрузки кабелей в локальной области изоляции и экрана кабелей температура превысит допустимое значение $90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Основные результаты работы заключаются в следующем.

Для исследования тепловых процессов в подземных кабельных сооружениях – воздушных каналах и туннелях применен метод многомасштабного моделирования.

На макромасштабе тепловое состояние силовых кабелей, проложенных в таких сооружениях, исследуется с помощью математической модели, в основе которой лежат уравнение, описывающее неизоэтермическое движение воздуха, и уравнение теплопроводности с учетом конвекции тепла в замкнутом объеме с тепловыми источниками. Рассчитаны тепловое поле и поле скоростей воздуха в кабельных сооружениях с симметричным расположением кабелей на напряжение 330 кВ. Определены наиболее теплонагруженные зоны в рассматриваемых сооружениях, исследован характер циркуляции в них воздуха.

На микроуровне – в малой области полиэтиленовой изоляции с газовым включением радиусом 10 мкм решена электротепловая задача при условии возникновения частичного разряда во включении. Показано возможное кратковременное повышение температуры в зоне включения на $\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$, что может влиять на изменение локальных свойств и структуры изоляции и при длительном влиянии уменьшить электрическую прочность этой зоны.

Для обеспечения надежности и длительности срока службы сверхвысоковольтных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена токовые нагрузки должны выбираться, исходя из заданных предельных значений температуры элементов кабелей с учетом не только условий

прокладки, но и дополнительного нагрева изоляции в локальных областях возникновения частичных разрядов.

Предлагаемый подход к исследованию тепловых процессов может быть использован при определении предельно допустимой нагрузочной способности кабельных линий в подземных воздушных сооружениях.

1. *Геххарт Б., Джасурия Й., Махаджан Р., Саммакия Б.* Свободно-конвективные течения, тепло- и массообмен. – В 2-х книгах, кн. 1. – М.: Мир, 1991. – 678 с.
2. *Кучерявая И.Н.* Компьютерное моделирование электротепловых процессов в полимерной изоляции с воздушным включением при возникновении единичного частичного разряда // Техн. електродинаміка. – 2011. – № 5. – С. 18–24.
3. *Кучерявая И.Н.* Численное исследование распределения электрического и температурного поля в полиэтиленовой изоляции силового кабеля с микровключением // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – Вип. 27. – 2010. – С. 117–123.
4. *Кучерявая И.Н.* Численное моделирование и исследование тепловых процессов в туннелях с силовыми кабелями // Гидроенергетика Украины. – 2006. – № 3. – С. 30–34.
5. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1978. – 736 с.
6. *Лях В.В., Молчанов В.М., Судаков И.В., Павличенко В.П.* Кабельная линия напряжением 330 кВ – новый этап развития электрических сетей Украины // Электрические сети и системы. – 2009. – № 3. – С. 16–21.
7. *Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н.* Многомасштабное моделирование в электротехнике. – К.: Изд. Ін-та електродинаміки НАН України, 2011. – 256 с.
8. *Шидловский А.К., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Антоненко Ю.А., Василец Л.Г., Гримуд Г.И.* Руководящий технический материал по сооружению, испытаниям и эксплуатации кабельных линий с использованием кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 64/110 кВ // Науч.-метод. изд. РТМ К28–004:2006. – Харьков: Майдан, 2007. – 62 с.
9. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
10. *Argaut P., Bjorlow-Larsen K., Zacccone E. Gustagsson A., Schell F., Waschke V.* Large projects of EHV underground cable system // Proc. of Conference Jicable'07. – Paris-Versailles, France, 24–28 June, 2007. – 11 p.
11. *Comsol Multiphysics*, version 3.5 – www.comsol.com
12. <http://www.yuzhcable.com.ua/> (Кабели силовые с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 220 кВ и 330 кВ.pdf)
13. *Junhua L., Zhang L., Yigang L.* Study on the thermal expansion of EHV cable line with large size conductor in tunnel // Proc. of the IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010. – New Orleans, LA, USA, 19–22 April 2010. – P. 1–5.
14. *Olympic tunnel 400 kV cable project Hackney substation to West Ham substation / Prysmian Cables & Systems Presentation.* – 67 p.

УДК 621.315.2 : 004.94

І.М. Кучерява, канд. техн. наук

Ін-т електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Дослідження процесів тепломасопереносу в повітряних спорудах з надвисоковольтними кабелями

Досліджено теплові процеси в підземних повітряних кабельних спорудах. На макрорівні знайдено розподілення температури в елементах кабелів з урахуванням вільно-конвективного руху повітря в тунелі та кабельному каналі. На мікрорівні розв'язано електротеплову задачу в газовому включенні в мікроструктурі поліетиленової ізоляції при частковому розряді та в його відсутності. Знайдено можливе підвищення температури в локальних зонах пошкодження ізоляції. Бібл. 14, рис. 4, таблиця.

Ключові слова: надвисоковольтні кабелі, неізотермічний рух повітря, газові включення в ізоляції, частковий розряд, багатомасштабне моделювання.

I.M. Kucheryava,

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, Ukraine

Study of heat-mass transfer processes in air canals with extra-high voltage cables

The thermal processes taking place in underground air canals with cables are studied. At macrolevel the temperature distributions in cable components are determined taking into account free-convective air flowing in tunnel and cable canal. At microlevel the electric and thermal problems in the gas inclusion which is in microstructure of polyethylene insulation are solved both in presence of partial discharge and without partial discharge. The potential temperature rise in local zones near imperfections of the insulation is determined. References 14, figures 4, table.

Key words: extra-high voltage cables, non-isothermal air flowing, gas inclusions in insulation, partial discharge, multi-scale modeling.

Надійшла 27.12.2011

Received 27.12.2011