

УДК 621.315.2.027.8

А.А.Щерба, член-корр. НАН України, А.Д.Подольцев, докт.техн.наук, И.Н.Кучерявая, канд.техн.наук (Ин-т электродинамики НАН Украины, Киев) В.М.Золотарев, канд.техн.наук (ЗАО "Завод "Южкабель", Харьков)

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ ПОЛЯРНЫХ МОЛЕКУЛ ВОДЫ В НЕОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЕЙ

Исследован процесс электрического транспорта полярных молекул воды в полимерной изоляции высоковольтного кабеля под действием резко неоднородного электрического поля, возникающего в области водного триинга. Показано, что при проявлении механизма диэлектрофореза молекулы воды "притягиваются" к острию триинга, создавая тем самым на острие локальную зону с повышенной влажностью. Наличие такого механизма может приводить к ускоренному старению изоляции. Разработаны математическая модель и методика численного расчета методом конечных элементов процесса электрического транспорта полярных молекул воды в полиэтиленовой изоляции силового кабеля с учетом различных дефектов и неоднородностей в ее структуре.

Досліджено процес електричного транспорту полярних молекул води в полімерній ізоляції високовольтного кабеля під дією різко неоднорідного електричного поля, що виникає в області водного триінга. Показано, що при прояві механізму діелектрофорезу молекули води "притягуються" до вістря триінга, створюючи тим самим на вістрі локальну зону з підвищеною вологістю. Наявність такого механізму може призводити до прискореного старіння ізоляції. Розроблено математичну модель і методику чисельного розрахунку методом кінцевих елементів процесу електричного транспорту полярних молекул води в полімерній ізоляції силового кабеля з урахуванням різних дефектів і неоднорідностей у її структурі.

Введение. Современные высоковольтные и сверхвысоковольтные кабели являются важной составной частью систем передачи и распределения электрической энергии, поскольку обеспечивают надежную и безопасную передачу большой электрической мощности (сотни–тысячи МВА) для промышленных и коммунальных потребителей в условиях плотных застроек, коммуникаций и других наземных препятствий, а также водных преград. Подземным кабельным линиям электропередачи по сравнению с воздушными линиями присущи: высокая надежность эксплуатации из-за устойчивости к критическим внешним воздействиям (обледенениям, ветровым нагрузкам и грозовым перенапряжениям), малая площадь землепользования и повышенная электромагнитная совместимость с окружающей средой.

В настоящее время даже сверхвысоковольтные линии электропередачи Украины ориентированы на использование кабелей со сшитой полиэтиленовой (СПЭ) изоляцией. Введена в эксплуатацию двузвеньева кабельная линия с СПЭ изоляцией на 330 кВ для передачи мощности 350 МВА от Приднепровской ТЭС на подстанцию 330/35/10 кВ "Печная" металлургического завода "Днепросталь" (Днепропетровск) [4]. Кабельная линия имеет длину более 11 км, проходит по защитной дамбе (длиной 3,5 км), пересекает реку Самара (шириной 0,5 км), Приднепровскую железную дорогу (шириной 0,5 км) и почти 200 различных инженерных сооружений (линии электропередачи разного напряжения, трамвайные линии, газо- и водопроводы, тепломагистралы и т.п.). Понятно, что строительство в таких условиях сверхвысоковольтных воздушных линий электропередачи проводить невозможно. Перспектива создания новых надежных высоковольтных и сверхвысоковольтных современных кабельных линий электропередачи подкреплена тем, что в Украине на заводе "Южкабель" (Харьков) впервые в СНГ освоен промышленный выпуск кабелей с СПЭ изоляцией на напряжения до 330 В [6].

Монолитная полимерная изоляция силового кабеля, в отличие от бумажной пропитанной изоляции, является более чувствительной к разного рода дефектам, которые повышают локальную напряженность электрического поля, снижают пробивное напряжение и создают предпосылки для образования электрических и водных триингов. Известно, что старение и последующий пробой полимерной изоляции силовых ка-

белей происходит при длительном воздействии переменного напряжения в результате роста электрических и водных триингов, состоящих из наполненных газом и влагой микроканалов [3,11] с характерным диаметром порядка 1 мкм. Триинги начинают расти в местах с повышенной локальной напряженностью электрического поля – в областях микровыступов на поверхности электродов, проводящих и воздушных включений, микротрещин, полостей и т.д. Динамика роста триингов и параметры частичных разрядов зависят от физико-химических свойств диэлектрика, частоты и величины прикладываемого напряжения, геометрии электродов и других параметров [8,11].

Изучение роста триингов стало особенно актуальным в последнее время в связи с использованием кабелей с полимерной изоляцией на напряжение до 330 кВ [4,5]. С помощью электронно-оптических и электронных измерительных установок были определены параметры частичных разрядов и пространственно-временные характеристики роста дендритов [9,10,12,19], а, исходя из этого, и технические требования и нормы для кабелей высокого и сверхвысокого напряжений [5]. Несмотря на интенсивные исследования, количественная теория, описывающая рост триингов под действием частичных разрядов, до сих пор не разработана из-за трудностей, обусловленных большим числом взаимосвязанных физико-химических процессов, приводящих к разрушению диэлектрика, и сложным стохастическим характером роста триингов.

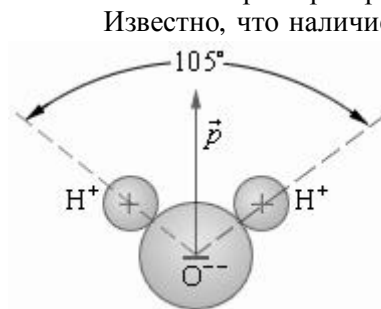


Рис. 1

Известно, что наличие влаги в полиэтиленовой изоляции приводит к ускоренному старению изоляции вследствие быстрого роста водных триингов в ее объеме [11,17]. Механизм быстрого развития водных триингов пока изучен недостаточно. В данной работе авторы обращают внимание на один из возможных факторов быстрого роста триингов, в основе которого лежит явление диэлектрфореза. Как известно, молекулы воды являются полярными молекулами, имеющими собственный электрический дипольный момент, равный $p=6,2 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Наличие этого момента вызвано смещением центра тяжести атомов водорода, несущих положительный заряд, относительно центра тяжести атома кислорода, имеющего отрицательный заряд (рис. 1, где показана структура молекулы воды и ее дипольный момент).

Известно [2,14,16], что на полярную молекулу, находящуюся в неоднородном постоянном или переменном электрическом поле, действует электрическая сила, втягивающая такую молекулу в зону с более сильным полем. Данное явление лежит в основе диэлектрфореза. Механизм возникновения электрической силы в неоднородном поле поясняется на рис. 2, а. В изоляции силового кабеля существует несколько областей, в которых электрическое поле является пространственно неоднородным и наиболее сильная неоднородность поля наблюдается на острие водного триинга, который может моделироваться в виде токопроводящей иглы, находящейся в изоляции. В силу этого обстоятельства вблизи острия триинга должны возникать электрические силы, "притягивающие" к этому острию полярные молекулы воды (а также все другие молекулы и микрочастицы, имеющие собственный или индуцированный дипольный момент, рис. 2, б). Вследствие наличия этого явления, в изоляции кабеля вблизи острия триинга формируется область с повышенным содержанием молекул воды, что может приводить к ускоренному росту триинга. Насколько можно судить по известным источникам, количественный анализ этого явления ранее не выполнялся.

Целью настоящей работы является изучение методом математического моделирования механизма электрического транспорта полярных молекул воды в полиэтиленовой изоляции силового кабеля под действием резко неоднородного электрического поля, существующего на острие водного триинга – явления диэлектрфореза в переменном электрическом поле, а также разработка математической модели и методики расчета, позволяющих прогнозировать распределение молекул воды по

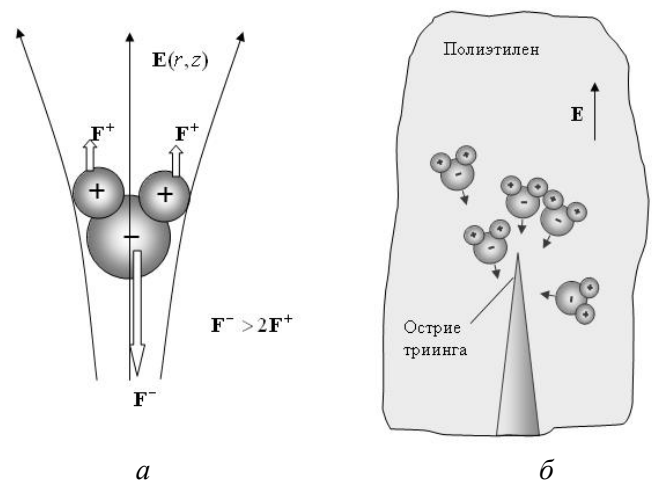


Рис. 2

сечению полиэтиленовой изоляции силового кабеля при наличии дефектов и различных неоднородностей в ней.

Электрическая сила, действующая на полярную молекулу воды в неоднородном электрическом поле. На молекулу воды, обладающую электрическим дипольным моментом \mathbf{p} и находящуюся во внешнем неоднородном электрическом поле \mathbf{E} (постоянном или изменяющемся во времени), действует электрическая сила, определяемая на основании следующего выражения [7]:

$$\mathbf{F}_e = (\mathbf{p} \cdot \nabla) \mathbf{E}. \quad (1)$$

Будем полагать, что молекула всегда направлена по полю \mathbf{E} , т.е. время релаксации молекулы $\tau \ll 1/f$, где $f = 50$ Гц – промышленная частота напряжения кабеля. Тогда выражение для дипольного момента молекулы в поле \mathbf{E} запишется как

$$\mathbf{p} = p \mathbf{E} / |\mathbf{E}|, \quad (2)$$

где дипольный момент для молекулы воды $p = 6,2 \cdot 10^{-30}$ Кл·м.

После подстановки выражения (2) в (1) получим

$$\mathbf{F}_e = \frac{p}{|\mathbf{E}|} (\mathbf{E} \cdot \nabla) \mathbf{E}. \quad (3)$$

Проведем преобразование выражения (3) для случая $\nabla \times \mathbf{E} = 0$, используя математическое тождество из [1]:

$$\nabla(\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}) = 2\mathbf{E} \times (\nabla \times \mathbf{E}) + 2(\mathbf{E} \cdot \nabla) \mathbf{E} = 2(\mathbf{E} \cdot \nabla) \mathbf{E}.$$

Тогда выражение (3) примет вид:

$$\mathbf{F}_e = p \nabla |\mathbf{E}|. \quad (4)$$

Из выражения (4) видно, что векторное силовое поле \mathbf{F}_e является потенциальным и амплитуда силы \mathbf{F}_e пропорциональна величине градиента модуля напряженности электрического поля, т.е. зависит от степени неоднородности поля в изоляторе.

Для расчета силы \mathbf{F}_e в диэлектрике кабеля необходимо предварительно рассчитать распределение векторной силовой функции электрического поля $\nabla |\mathbf{E}|$ во всех представляющих интерес точках изоляции. С этой целью в работе решалась полевая задача для области водного триинга. Типичная структура такого триинга показана на рис. 3, а, а расчетная область задачи отображена на рис. 3, б. Здесь для простоты рассмотрен случай осевой симметрии, что позволяет рассматривать задачу в двумерной постановке в цилиндрической системе координат $r\theta z$.

Распределение электрического потенциала в области триинга в приближении электростатики описывается дифференциальным уравнением для электрического потенциала φ вида

$$\nabla \cdot (-\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \varphi) = 0, \quad (5)$$

где $\varepsilon_r = 2,4$ – относительное значение диэлектрической проницаемости полиэтиленовой изоляции.

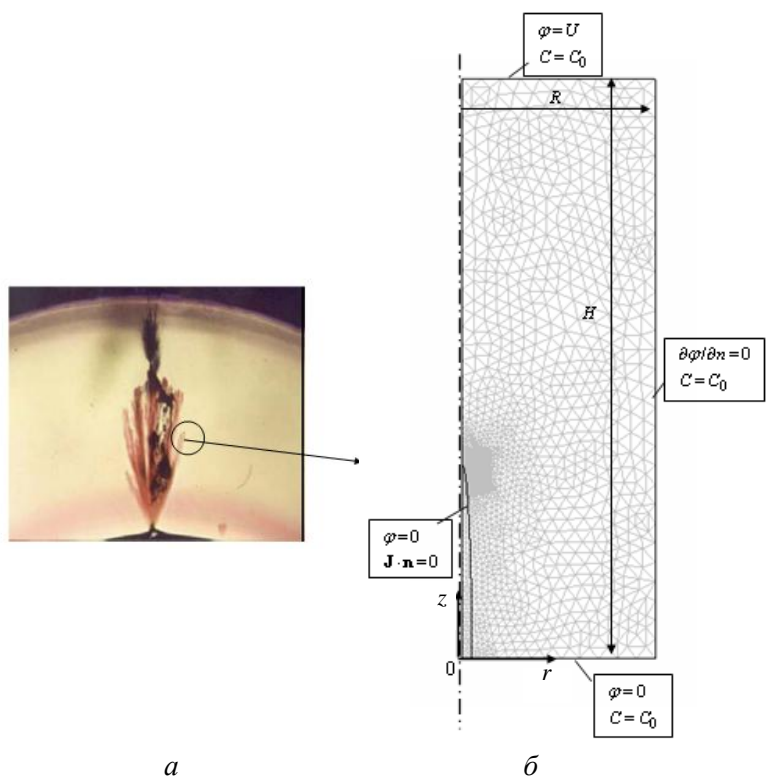


Рис. 3

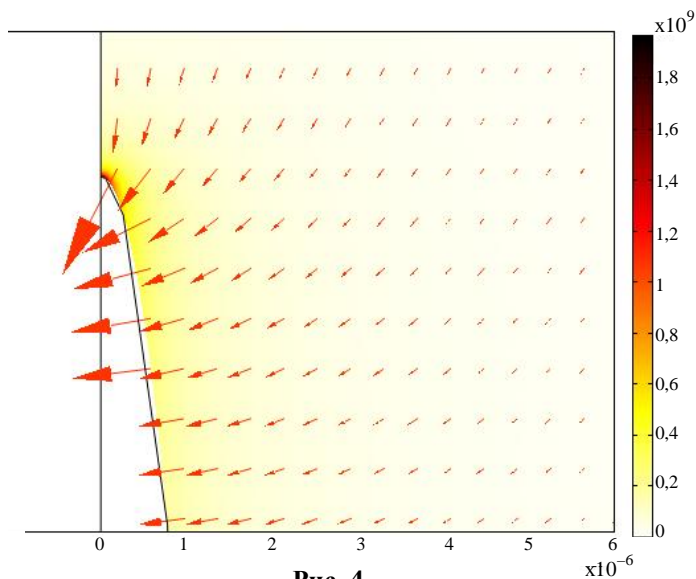


Рис. 4

Граничные значения для рассматриваемой электрической полевой задачи показаны на рис. 3, б. Указанные здесь величины имеют следующие значения: $H=120$ мкм, $R=40$ мкм, $U=1200$ В, что соответствует среднему значению напряженности поля $E_0 = U/H = 10$ кВ/мм, радиус закругления острия триинга составляет $r_{mp} \approx 0,5$ мкм.

Описанная полевая задача решалась численно методом конечных элементов с помощью программы COMSOL 3.3 [20]. После нахождения электрического потенциала выполнялся расчет напряженности электрического поля согласно выражению $\mathbf{E} = -\nabla\varphi$, а затем определялись значения силовой функции $\nabla|\mathbf{E}|$, числен-

но равной силе, действующей на диполь с единичным электрическим дипольным моментом. Далее полагается, что все величины изменяются с частотой 50 Гц, во всех выражениях используются их действующие значения.

На рис. 4 в градиентном цвете и в виде стрелок показано полученное расчетным путем распределение поля \mathbf{E} в расчетной области на острие триинга. Область с максимальным полем локализована на острие триинга и имеет характерный размер порядка r_{mp} .

На рис. 5 показано распределение электрической силы \mathbf{F}_e , действующей на молекулы воды в объеме изоляции (рис. 5, а) и на острие триинга (рис. 5, б). Здесь показано значение $\log(F_e)$ в оттенках серого цвета и вектор \mathbf{F}_e с помощью стрелок. Из рис. 5 видно, что в окрестности всего триинга действуют силы, "притягивающие" молекулы к триингу, однако наибольшая сила действует на его острие в области с характерным размером, меньшим радиуса r_{mp} .

Математическое моделирование диэлектрфореза молекул воды в объеме полиэтиленовой изоляции. Распределение молекул воды в объеме изоляции силового кабеля будем характеризовать величиной концентрации $C(r, z, t)$, являющейся функцией пространственных координат r, z и времени t . Полагаем, что их движение обусловлено процессами молекулярной диффузии и дрейфа в неоднородном электрическом поле под действием сил диэлектрфореза. Другими словами, рассматриваем процесс электрокинетики в диффузионно-дрейфовом приближении.

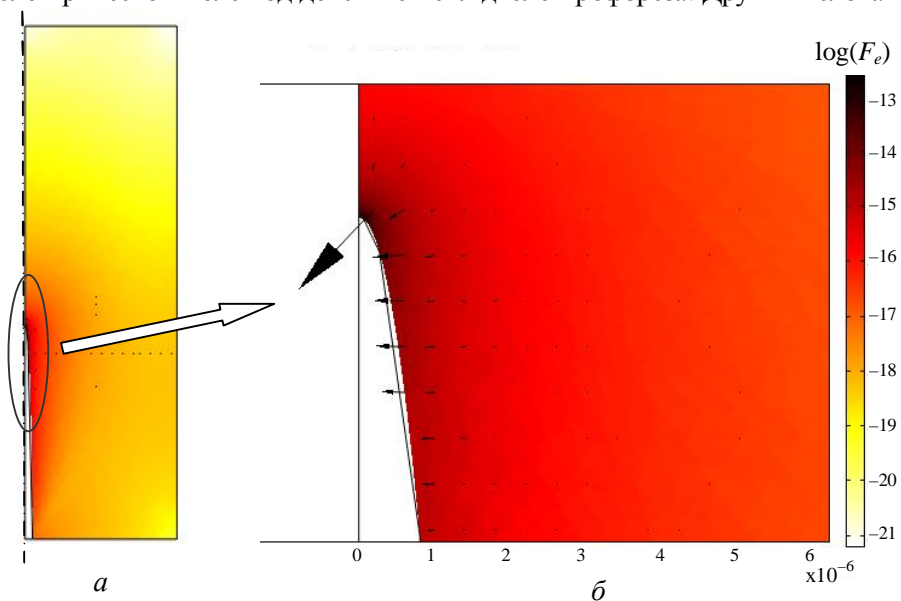


Рис. 5

Рис. 5

Рис. 5

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0. \quad (6)$$

В уравнении (6) величина потока молекул \mathbf{J} состоит из двух составляющих, отражающих процессы диффузии и действие электрических сил:

$$\mathbf{J} = -D\nabla C + Cbp\nabla|\mathbf{E}|. \quad (7)$$

Здесь D – коэффициент молекулярной диффузии, b – подвижность молекул воды в полиэтилене. Согласно соотношению Эйнштейна, коэффициент диффузии D связан с подвижностью следующим равенством

$$D = bk_B T, \quad (8)$$

где $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура изоляции.

Уравнение (6) с учетом (7) запишется окончательно в виде следующего дифференциального уравнения в частных производных

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D\nabla C - Cbp\nabla|\mathbf{E}|). \quad (9)$$

В качестве начального условия будем полагать, что в начальный момент времени концентрация молекул воды во всем объеме полиэтилена одинакова и равна $C|_{t=0} = C_0$. В качестве граничных условий принимались значения концентрации, показанные на рис. 3, б.

Математическая модель, включающая дифференциальные уравнения (5) и (9), а также принятые начальные и граничные условия описывают электрокинетическую динамику диффузионно-дрейфового движения молекул воды в полиэтиленовой изоляции с учетом наличия неоднородного электрического поля. Численная реализация этой модели проводилась методом конечных элементов в пакете программ COMSOL [20].

Для выбора значения коэффициента молекулярной диффузии в полиэтилене воспользуемся результатами работы [18]. Зависимость коэффициента диффузии от температуры выражается формулой Аррениуса в виде

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{W_a}{RT}\right), \quad (10)$$

где энергия активации $W_a = 13.3$ ккал/моль, $W_a/T = 6700$ К. Экспериментальным путем установлено [18], что для полиэтиленовой изоляции силовых кабелей коэффициент $D_0 = 0,33$ м²/с. По числовым значениям коэффициентов в (10) построена показанная на рис. 6 зависимость коэффициента молекулярной диффузии полиэтилена D от температуры. В расчетах выбиралась температура изоляции 90 °С, для которой согласно рис. 6 $D = 3,2 \cdot 10^{-9}$ м²/с.

Анализ электрического транспорта молекул воды в объеме полиэтиленовой изоляции.

Оценка скорости движения молекул. Выполним некоторые предварительные оценочные расчеты. Согласно равенству (7), величина $\mathbf{u} = bp\nabla|\mathbf{E}|$ представляет собой скорость диэлектрофоретического движения молекул воды (а также других молекул или наночастиц, имеющих дипольный момент) в неоднородном электрическом поле. Для оценки значения этой скорости принимаем $b = D/(k_B T) = 3,2 \cdot 10^{-9} / (1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300) = 7,8 \cdot 10^{11}$ м·с⁻¹·Н⁻¹. Полагая величину поля в изоляции кабеля $E = 10$ кВ/мм, а характерный размер уменьшения поля $\sim 0,1$ м, получим $\nabla|\mathbf{E}| = 10^8$ В/м². Отсюда величина скорости $u = 4,8 \cdot 10^{10}$ м/с = 15 мм/час. То есть, за время порядка одного года молекулы воды пройдут путь, равный толщине изоляции кабеля. Так как электрическое поле в изоляции кабеля больше на поверхности ее жилы, чем на внешнем экране, то механизм диэлектрофореза будет способствовать медленному проникновению молекул воды из внешнего грунта и их продвижению вглубь изоляции в течение продолжительного времени, составляющего годы. Отметим, что характерный пространственный масштаб триинга составляет всего несколько микрон, а величина электрического поля на его острие значительно превышает величину среднего поля в изоляции кабеля, отсюда и скорость движения молекул воды к острию этого триинга, как будет показано далее, значительно выше.

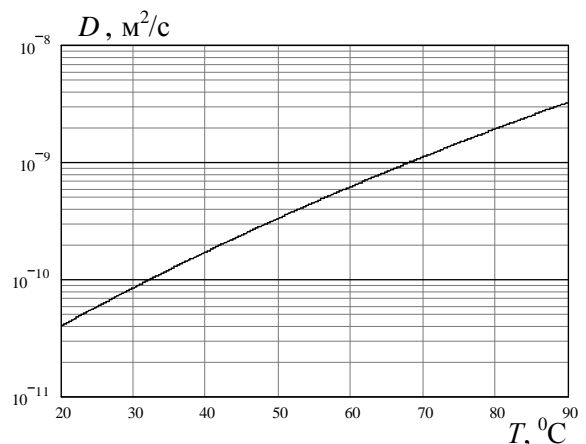


Рис. 6

Распределение молекул воды в неоднородном электрическом поле в установившемся режиме. Из уравнения (9) следует, что распределение концентрации молекул в установившемся режиме удовлетворяет уравнению

$$\nabla \cdot (D\nabla C - Cbp\nabla|\mathbf{E}|) = 0. \quad (11)$$

Решение этого уравнения в одномерном случае на поверхности триинга в предположении, что в этой области скорость диэлектрофореза $u = bp\partial E/\partial x = \text{const}$, имеет следующий вид:

$$C = C_1 \exp(-x/\lambda_D),$$

где $\lambda_D = D/u$ – толщина дебаевского диэлектрофоретического слоя. Физически, величина λ_D характеризует толщину приповерхностной зоны с повышенной концентрацией молекул. Для оценки значения λ_D будем использовать следующие значения: $D = 4 \cdot 10^{-11}$ м²/с при температуре 20 °С, $\mathbf{u} = bp\nabla|\mathbf{E}| = 7,8 \cdot 10^{11} \cdot 6,2 \cdot 10^{-30} \cdot 10^{10} = 4,8 \cdot 10^{-8}$ м/с. Отсюда $\lambda_D = D/u = 0,83$ мм. Отметим, что это справедливо при постоянном значении величины $|\nabla|\mathbf{E}||$ на промежутке λ_D . Как будет показано далее, в области триинга зона с неоднородным полем локализована только на острие триинга.

Результаты численного расчета. На основе описанной выше математической модели рассчитывалась динамика концентрации частиц в окрестности острия триинга. Пространственное распределение концентрации молекул, отнесенной к среднему значению C_0 в момент времени 10 с, показано на рис. 7. Из проведенных расчетов следует, что за время порядка 10 с устанавливается стационарное распределение концентрации молекул на острие, при этом максимальное значение концентрации достигается на оси симметрии на поверхности острия, и равно $C = 5,5C_0$, т.е. за счет существующего механизма диэлектрофореза концентрация молекул на острие триинга в 5,5 раз превышает среднюю концентрацию в изоляции кабеля. На рис. 7 наряду со значениями концентрации показаны в виде стрелок векторы потока молекул под действием электрических сил

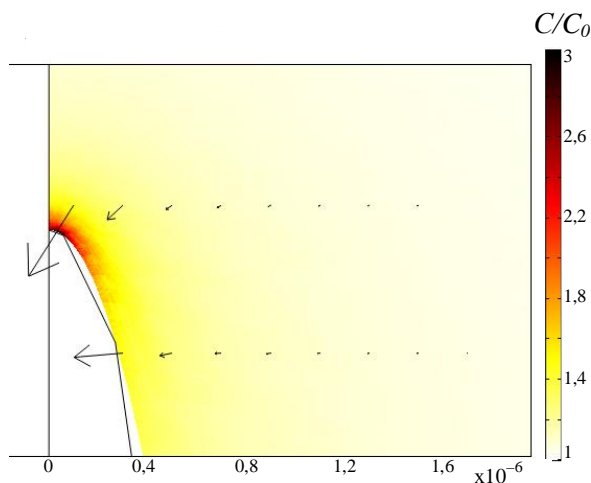


Рис. 7

$\mathbf{J}_e = Cbp\nabla|\mathbf{E}|$. Видно, что водный триинг "притягивает" к себе молекулы воды из окружающего его объема полиэтиленовой изоляции. Таким образом, результаты расчетов иллюстрируют тот факт, что на острие триинга механизм электрокинетического движения полярных молекул воды может играть существенную роль в процессе роста триинга. В частности, образовавшаяся вследствие проявления такого механизма на острие триинга зона с повышенной влажностью может способствовать более быстрому прорастанию триинга вглубь изоляции, что будет приводить к ускоренному старению изоляции.

Неравномерность распределения концентрации молекул воды по оси симметрии в зоне острия отображена на рис. 8. Здесь изменение концентрации C/C_0 показано в функции расстояния до острия триинга. Как следует из рис. 8, характерный размер зоны с повышенной концентрацией молекул воды составляет порядка 200 нм. Очевидно, что для более деталь-

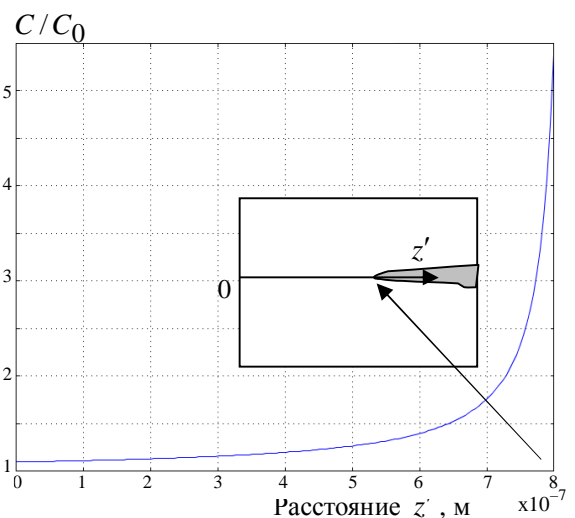


Рис. 8

ного изучения процессов в этой зоне необходимо привлечение теории наномерных диэлектрических систем, которая в настоящее время находится только на начальном этапе развития, например, [13,15].

Заключение. В работе предложен и количественно исследован механизм электрического транспорта полярных молекул воды в полиэтиленовой изоляции силового кабеля в области резко неоднородного электрического поля, существующего на острие водного триинга. Показано, что в этой области на полярные молекулы воды действуют электрические силы, направленные в область увеличения поля и способствующие их движению в зону острия. В силу электрокинетического механизма движения молекул на острие триингов возникает зона с повышенной влажностью, что может приводить к быстрому прорастанию триингов вглубь изоляции и, как следствие, к ускоренному старению полиэтиленовой изоляции силового кабеля.

Разработаны математическая модель и методика численного расчета методом конечных элементов неоднородного электрического поля на острие триинга и процесса электрического транспорта полярных молекул воды в этой зоне. Результаты компьютерного моделирования показывают, что зона с повышенной концентрацией молекул воды локализована на острие триинга и имеет характерный размер порядка 200 нм. При этом максимальная концентрация молекул в этой зоне в 5 раз превышает среднюю концентрацию молекул воды в основном объеме изоляции силового кабеля.

1. *Борисенко А.И., Тарапов И.Е.* Векторный анализ и начала тензорного исчисления. – М.: Высшая школа, 1966. – 252 с.
2. *Духин С.С., Дерягин Б.В.* Электрофорез. – М. Наука, 1976. – 550 с.
3. *Кучинский Г.С.* Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, 1979.
4. *Лях В.В., Молчанов В.М., Судакова 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.
5. *Мецанов Г.И., Шувалов М.Ю., Каменский М.К., Образцов Ю.В., Овсиенко В.Л.* Кабели на напряжение 10–500 кВ: состояние и перспективы развития (анализ, прогноз, исследования) // Кабели и провода. – 2008. – № 5 (312). – С. 32–38.
6. *Новости* от завода "Южкабель". Испытываются новые кабели // Кабели и провода. – 2009. – № 5 (312). – 26 с.
7. *Парселл Э.* Электричество и магнетизм. – М.: Наука, 1983. – 416 с.
8. *Шувалов М.Ю., Образцов Ю.В., Овсиенко В.Л., Удовіцький П.Ю., Мнека А.С.* Развитие водных триингов в экструдированной кабельной изоляции как электрический эффект Ребиндера. Часть 1 // Кабели и провода. – 2006. – № 4 (299). – С. 14–19.
9. *Champion J.V., Dodd S.J.* // Journal Phys, D. – 1996. – Vol. 29. – Pp. 862–868.
10. *Champion J.V., Dodd S.J., Alison J.M.* // Journal Phys. D. – 1996. – Vol. 29. – Pp. 2689–2695.
11. *Dissado L.A., Fothergill J.C.* Electrical Degradation and Breakdown in Polymers. – Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom, 1992. – 590 p.
12. *Ehara Y., Naoe M., Urano K. et al.* // IEEE Trans. Dielectrics El. – 1998. – Vol. 5. – Pp. 728–733.
13. *Green C., Vaughan A.* Nanodielectrics – How Much Do We Really Understand? // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2008. – V.24. – No.4. – Pp. 6–16.
14. *Handbook of Electrostatic Processes* / Ed. J. Chang, A.J.Kelly, J.M.Crowley. Marcel Dekker. – 1995. – 763 p.
15. *Nelson J.K.* The Promise of Dielectric Nanocomposites // Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. – 2006. – Pp. 452–457.
16. *Pohl H.A.* Dielectrophoresis. – Cambridge University Press, 1978.
17. *Sletbak J.* A theory of water tree initiation and growth. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. PAS-98. – 1979. – No.4. – Pp. 1358–1365.
18. *Sletbak J.* The effect of service and test conditions on water tree growth. // IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. PAS-102. – 1983. – No.7. – Pp. 2069–2076.
19. *Suwarno, Suzuoki Y. Komori F. et al.* Partial Discharges due to Electrical Treeing in Polymers // J. Phys. D. – 1996. – Vol. 29. – Pp. 2922–2931.
20. www.comsol.com

Надійшла 22.04.2010