

УДК 536.2:621.3.04

ТЕМПЕРАТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЛОГО ЦИЛИНДРА ИЗ ПОЛИМЕРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА С ЗАВИСЯЩИМИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

В. С. Зарубин, В. Н. Зимин, Г. Н. Кувыркин

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
105005 Москва, Россия
E-mails: zarubin@bmstu.ru, zimmin@bmstu.ru, fn2@bmstu.ru

Построена математическая модель, описывающая установившееся одномерное распределение температуры в полом круговом цилиндре из полимерного диэлектрика при постоянной разности потенциалов электрического поля на поверхностях цилиндра. С использованием систематизированных данных о зависимости от температуры тепло- и электропроводности полимерных материалов, применяемых в технике в качестве диэлектриков, проведен количественный анализ модели при заданных плотности теплового потока, подводимого к внутренней поверхности цилиндра, и интенсивности конвективного теплообмена на внешней поверхности. Полученные результаты позволяют определить области применения полимерных диэлектриков в различных электротехнических устройствах, в том числе для электроизоляции высоковольтных кабелей постоянного напряжения, и сформулировать условия возникновения теплового пробоя цилиндрического слоя диэлектрика.

Ключевые слова: нелинейная математическая модель, полимерный диэлектрик, одномерное распределение температуры, интегральные соотношения.

DOI: 10.15372/PMTF20190109

Введение. Существующие полимерные материалы, применяемые в различных электротехнических и радиотехнических устройствах в качестве диэлектриков, характеризуются высоким удельным электросопротивлением, которое при температуре, приблизительно равной 300 К, имеет значения $10^{14} \div 10^{18}$ Ом · м [1–5]. Однако при большой разности потенциалов электрического поля на поверхностях слоя диэлектрика даже при таких значениях удельного электросопротивления проходящий через слой электрический ток вызывает выделение джоулевой теплоты, приводящее к повышению температуры диэлектрика и как следствие к уменьшению электросопротивления. Это, в свою очередь, приводит к дальнейшему увеличению силы тока и объемного энерговыделения. При малых значениях теплопроводности полимерных материалов и интенсивности теплоотвода выделившейся энергии в окружающую среду создаются условия, при которых температурное состояние диэлектрика является неустановившимся. В этом случае имеет место тепловой пробой диэлектрика [6, 7].

Работа выполнена в рамках государственных заданий Министерства образования и науки РФ (коды проектов 9.7784.2017/БЧ, 9.2422.2017/ПЧ).

© Зарубин В. С., Зимин В. Н., Кувыркин Г. Н., 2019

Надежному функционированию полимерного диэлектрика при высокой разности электрических потенциалов способствуют интенсификация отвода выделившейся в нем джоулевой теплоты и использование материала с максимально возможным значением теплопроводности, причем желательно возрастающим с увеличением температуры, что характерно для некоторых полимерных материалов. Одной из областей применения полимерных диэлектриков является электроизоляция токоведущих жил высоковольтных кабелей [8, 9]. Существующие полимерные материалы позволяют повысить рабочее напряжение кабелей, в том числе используемых в линиях постоянного тока, имеющих ряд преимуществ по сравнению с кабельными линиями переменного напряжения [10].

Количественный анализ температурного состояния диэлектрика для оценки его работоспособности требует решения сложной нелинейной задачи, учитывающей зависимости от температуры удельного электросопротивления диэлектрика и его теплопроводности. Для этого необходимо использовать современные методы математического моделирования [11, 12]. В настоящей работе для длинного полого кругового цилиндра, с помощью которого моделируется слой электроизоляции высоковольтного кабеля [8–10], сформулирована задача об установившейся теплопроводности при постоянной разности электрических потенциалов на поверхностях цилиндра.

Для решения сформулированной задачи дифференциальные уравнения математической модели, описывающие температурное состояние полого цилиндра из полимерного диэлектрика, преобразованы к двум интегральным соотношениям, с помощью которых рассчитаны температура и модуль вектора напряженности электрического поля в рассматриваемом цилиндре. На основе полученных данных сформулированы условия возникновения теплового пробоя цилиндра [6].

Постановка задачи. На внутренней поверхности радиусом r_0 полого кругового цилиндра из однородного полимерного диэлектрика задана плотность q_0 подводимого теплового потока, а на внешней поверхности радиусом r_1 — условия конвективного теплообмена, определяемые суммарным термическим сопротивлением R_* между этой поверхностью и окружающей средой с температурой T_* . При постоянных значениях потенциала электрического поля на каждой поверхности достаточно длинного (по сравнению с радиусом r_1) цилиндра установившееся распределение $T(r)$ температуры можно считать одномерным, зависящим лишь от радиальной координаты r и удовлетворяющим дифференциальному уравнению [13]

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \lambda(T) \frac{dT(r)}{dr} \right) + q_V(T, r) = 0, \quad r \in (r_0, r_1) \quad (1)$$

с граничными условиями

$$\lambda(T) \frac{dT(r)}{dr} \Big|_{r=r_0} = -q_0, \quad \lambda(T) \frac{dT(r)}{dr} \Big|_{r=r_1} = -\frac{T(r_1) - T_*}{R_*}. \quad (2)$$

Здесь λ — зависящая от температуры теплопроводность диэлектрика; q_V — зависящая от температуры и координаты объемная мощность энерговыделения, обусловленная переходом части электрической энергии в джоулеву теплоту и равная произведению локальных значений $j(r)$ и $E(r)$ модулей радиально направленных векторов плотности электрического тока, проходящего через диэлектрик, и напряженности электрического поля.

Примем потенциал электрического поля на внутренней поверхности цилиндра равным нулю: $U(r_0) = 0$, а на внешней поверхности $U(r_1) = U_1 > 0$ (знак потенциала U_1 не оказывает влияния на значение E , поскольку в данном случае $E(r) = |dU(r)/dr|$). Из условия сохранения в рассматриваемом диэлектрике подвижных электрических зарядов следует равенство $j(r)r = j_0 r_0 = \text{const}$, где $j_0 = j(r_0)$ — модуль вектора плотности электрического тока на внутренней поверхности цилиндра. Отношение локальных значений $E(r)$ и $j(r)$

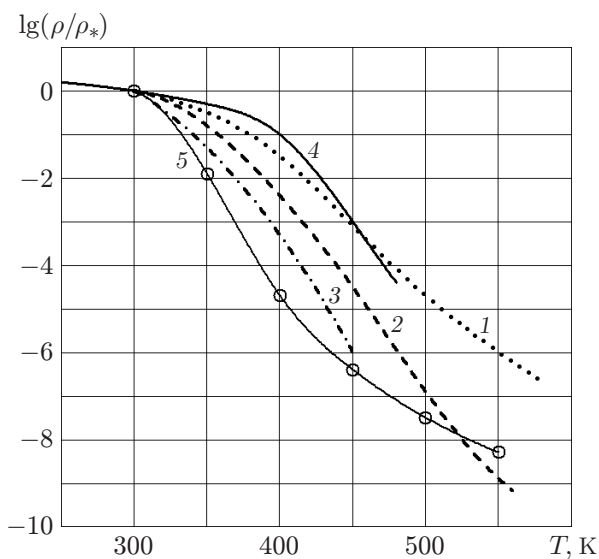


Рис. 1

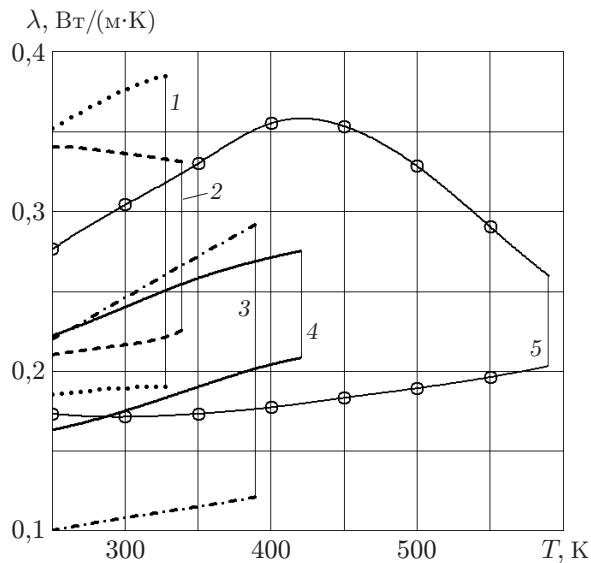


Рис. 2

Рис. 1. Зависимости электросопротивления от температуры для некоторых полимерных материалов:

1 — полипиромеллитимид (каптон), 2 — полиэтилентерефталат (дакрон, лавсан, майлар), 3 — полихлортрифторэтилен (фторопласт-3), 4 — поликарбонат (макролон, мерлон), 5 — политетрафторэтилен (фторопласт-4, тефлон)

Рис. 2. Интервалы изменения теплопроводности при изменении температуры для некоторых полимерных материалов (обозначения те же, что на рис. 1)

зависит от локального значения $T(r)$ температуры, поскольку $E(r)/j(r) = \rho(T)$ (ρ — зависящее от температуры удельное электросопротивление диэлектрика (далее слово “удельное” опускается)) [2]. Следовательно, объемная мощность энерговыделения определяется из соотношения

$$q_V(T, r) = (E(r))^2/\rho(T) = \rho(T)(j_0 r_0/r)^2. \tag{3}$$

На рис. 1 приведены экспериментальные зависимости электросопротивления от температуры для некоторых полимерных материалов, применяемых в качестве диэлектриков [1]. По оси ординат отложен десятичный логарифм отношения ρ/ρ_* (ρ_* — электросопротивление при температуре $T = 300$ К для каждого материала: $\rho_* = 10^{16}$ Ом·м — полипиромеллитимид, $\rho_* = 1,58 \cdot 10^{15}$ Ом·м — полиэтилентерефталат, $\rho_* = 6,31 \cdot 10^{16}$ Ом·м — полихлортрифторэтилен, $\rho_* = 3,16 \cdot 10^{14}$ Ом·м — поликарбонат, $\rho_* = 10^{17}$ Ом·м — политетрафторэтилен).

Как правило, теплопроводность полимерных диэлектриков возрастает с увеличением температуры и существенно зависит от их микроструктуры, которая, в свою очередь, может изменяться при изменении температуры. В случае аморфной структуры, соответствующей хаотическому расположению макромолекул полимера, теплопроводность обычно имеет наименьшее значение и увеличивается по мере упорядочивания расположения макромолекул, обусловленного некоторым увеличением плотности полимера и характеризуемого степенью его кристалличности [1, 14]. На рис. 2 для указанных полимерных материалов приведены зависящие от температуры интервалы изменения теплопроводности при переходе от аморфной структуры (нижняя граница) к структуре с наибольшей плотностью (верхняя граница) [1, 9]. В случае полипиромеллитимида положение кривых

зависит не от структуры полимера, а от модификации производимого компанией Du Pont (США) материала с промышленной маркой каптон (нижняя граница — Kapton H, верхняя — Kapton HN [15]).

Уравнение (1) и граничные условия (2) с учетом равенства (3) и данных об электросопротивлении и теплопроводности полимерных материалов описывают установившееся одномерное распределение $T(r)$ температуры в полем цилиндре из полимерного диэлектрика. Вследствие нелинейности уравнения (1) представить его решение в замкнутой аналитической форме относительно $T(r)$ невозможно. Однако если зависимости $\rho(T)$ и $\lambda(T)$ известны, можно построить интегральные соотношения, связывающие эти зависимости с искомым распределением температуры в слое диэлектрика.

Построение интегральных соотношений. С учетом равенства (3) уравнение (1) представим в виде

$$r \frac{d}{dr} \left(r \lambda(T) \frac{dT(r)}{dr} \right) + \rho(T) (j_0 r_0)^2 = 0. \quad (4)$$

Подставляя в (4) $r \lambda(T) dT(r)/dr = p$, можно записать

$$p \frac{dp}{dT} + \lambda(T) \rho(T) (j_0 r_0)^2 = 0$$

и затем для исходного уравнения получить первый интеграл

$$\left(r \lambda(T) \frac{dT(r)}{dr} \right)^2 = C_1 - 2(j_0 r_0)^2 \int_{T_0}^T \lambda(T') \rho(T') dT',$$

где $T_0 = T(r_0)$. Используя первое граничное условие (2) при $r = r_0$, вычисляем константу $C_1 = (q_0 r_0)^2$ и, подставляя ее в первый интеграл, получаем обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка

$$r \lambda(T) \frac{dT(r)}{dr} = \pm r_0 \left(q_0^2 + 2j_0^2 \int_T^{T_0} \lambda(T') \rho(T') dT' \right)^{1/2}. \quad (5)$$

Поскольку левая часть уравнения (5) не является положительной [13], в правой части этого уравнения выбираем знак “минус” и после интегрирования записываем

$$\ln \frac{r}{r_0} = C_2 - \frac{1}{r_0} \int_{T_0}^{T(r)} \left(q_0^2 + 2j_0^2 \int_T^{T_0} \lambda(T') \rho(T') dT' \right)^{-1/2} \lambda(T) dT.$$

Здесь $C_2 = 0$, так как при $r = r_0$ совпадают пределы интегрирования внешнего интеграла. В итоге получаем соотношение

$$\ln \frac{r}{r_0} = \int_{T(r)}^{T_0} \left((q_0 r_0)^2 + 2(j_0 r_0)^2 \int_T^{T_0} \lambda(T') \rho(T') dT' \right)^{-1/2} \lambda(T) dT, \quad (6)$$

определяющее искомое распределение $T(r)$ через неизвестные значения j_0 , T_0 .

Потери в единицу времени электрической энергии в виде джоулевой теплоты, приходящиеся на единицу площади внешней поверхности цилиндра, равны $j_0 U_1 r_0 / r_1$. Поэтому с учетом второго граничного условия (2) и равенства (5) можно записать

$$\left(r_1 \lambda(T) \frac{dT(r)}{dr} \Big|_{r=r_1} \right)^2 = Q^2 2j_0^2 r_0^2 \int_{T_1}^{T_0} \lambda(T) \rho(T) dT = (Q + j_0 r_0 U_1)^2 = \left(\frac{T_1 - T_*}{R} \right)^2,$$

где $Q = q_0 r_0$; $T_1 = T(r_1)$; $R = R_*/r_1$. Отсюда получаем выражение

$$j_0^2 r_0^2 = \left(2 \int_{T_1}^{T_0} \lambda(T) \rho(T) dT \right)^{-1} \left(\frac{(T_1 - T_*)^2}{R^2} - Q_2 \right) = I(T_0, T_1) \quad (7)$$

и первое интегральное соотношение

$$U_1^2 = 2 \frac{(T_1 - T_*)/R - Q}{(T_1 - T_*)/R + Q} \int_{T_1}^{T_0} \lambda(T) \rho(T) dT, \quad (8)$$

устанавливающее связь искомых температур T_0 и T_1 с заданными значениями U_1 , R , Q и известными зависимостями λ и ρ от температуры.

Полагая в формуле (6) при $r = r_1$ нижний предел во внешнем интеграле равным T_1 и используя равенство (7), получаем второе интегральное соотношение

$$\ln \frac{r_1}{r_0} = \int_{T_1}^{T_0} \left((q_0 r_0)^2 + 2I(T_0, T_1) \int_T^{T_0} \lambda(T') \rho(T') dT' \right)^{-1/2} \lambda(T) dT, \quad (9)$$

содержащее искомые значения T_0 и T_1 . С использованием соотношений (8), (9) можно вычислить эти значения, а затем с помощью равенства (7) по формуле (6) рассчитать распределение $T(r)$ температуры в рассматриваемом полем цилиндре.

Количественный анализ интегральных соотношений. На рис. 1 видно, что наиболее существенно различаются зависимости электросопротивления от температуры для поликарбоната и политетрафторэтилена. Количественный анализ полученных выше интегральных соотношений проведем для этих двух полимеров, выбрав для них одинаковое значение $T_* = 300$ К. Заметим, что при фиксированных значениях R и Q и отсутствии электрического поля в диэлектрике температура внешней поверхности цилиндра равна $T_* + RQ$.

На рис. 3 приведены рассчитанные для поликарбоната с использованием интегральных соотношений (8), (9) зависимости от T_1 температуры T_0 и электрического потенциала U_1 при $R = 5$ м·К/Вт, $Q = 5$ Вт/м, $r^* = r_1/r_0 = 2$ и двух предельных зависимостях теплопроводности от температуры (см. рис. 2), ограничивающих изменение теплопроводности.

Зависимости $U_1(T_1)$ (см. рис. 3) имеют максимум, соответствующий состоянию, предшествующему возникновению теплового пробоя диэлектрика, причем при большем значении теплопроводности ордината U_1^* максимума имеет большее значение. Абсциссам T_1^* максимумов соответствуют значения T_0^* температуры внутренней поверхности цилиндра (при большем значении теплопроводности эта температура меньше).

Соответствие значений U_1^* определяемым ими значениям T_0^* показано на рис. 3 вертикальными стрелками. При $T_1 > T_1^*$ установившиеся температурные состояния цилиндра нереализуемы вследствие неустойчивости соответствующих решений уравнения (1) с граничными условиями (2) [12]. Следует отметить, что при выбранных значениях R , Q , r^* значение напряжения U_1 , приводящее к электрическому пробую диэлектрика [1], может быть меньше U_1^* .

Для каждого из двух полученных сочетаний значений T_1^* и T_0^* по формулам (6), (7) рассчитаны распределения температуры T в полем цилиндре из поликарбоната по координате $\zeta = r/r_0 - 1$ (рис. 4). Также на рис. 4 при тех же сочетаниях температур приведены распределения по толщине цилиндра безразмерных значений $E^* = Er_0/U_1^*$ и E_0^* модуля E

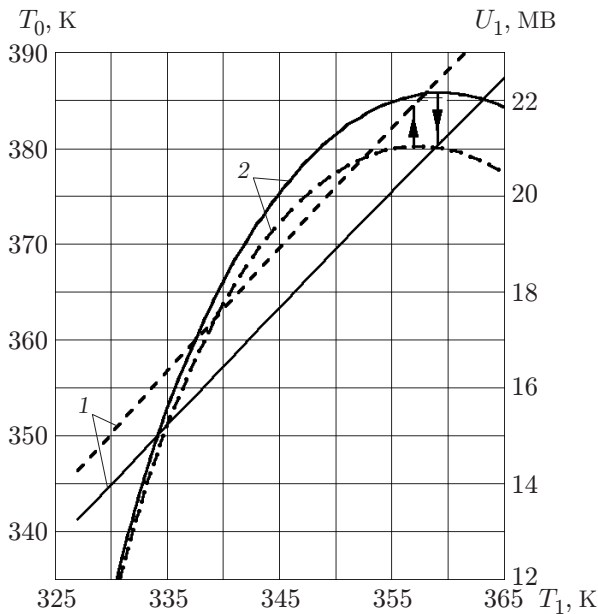


Рис. 3

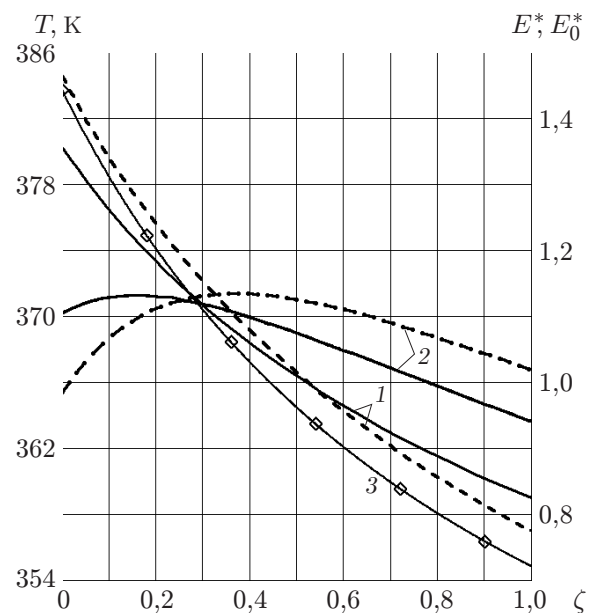


Рис. 4

Рис. 3. Зависимости от температуры T_1 внешней поверхности цилиндра из поликарбоната температуры T_0 его внутренней поверхности (1) и электрического потенциала U_1 (2) при $R = 5 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$, $Q = 5 \text{ Вт/м}$, $r^* = 2$:

сплошные линии — верхняя граница, штриховые — нижняя

Рис. 4. Распределения по толщине цилиндра из поликарбоната температуры T (1) и безразмерных значений модуля вектора напряженности электрического поля E^* (2) и E_0^* (3) при $R = 5 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$, $Q = 5 \text{ Вт/м}$, $r^* = 2$:

сплошные линии — верхняя граница, штриховые — нижняя

вектора напряженности электрического поля. Видно, что при увеличении температуры изменение электросопротивления приводит к выравниванию распределения E по толщине цилиндра из поликарбоната относительно значения $E^* = 1$ и существенному уменьшению значения модуля вектора напряженности электрического поля вблизи внутренней поверхности цилиндра.

При увеличении параметров R , Q и уменьшении $r^* = r_1/r_0$ в случае цилиндра из поликарбоната значение U_1^* уменьшается (на рис. 5 нисходящие ветви кривых $U_1(T_1)$ не показаны, а точки максимумов этих зависимостей соединены с соответствующими кривыми для температуры T_0 вертикальными линиями). На рис. 5 при одном и том же значении $R = 5 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$, $Q = 5 \text{ Вт/м}$ кривым при $r^* = 2$ (кривым 3) соответствуют кривые при $r^* = 1,5$ (кривые 4) для полого цилиндра меньшей относительной толщины (см. рис. 3), вследствие чего значения U_1^* уменьшаются. При этом влияние теплопроводности поликарбоната на напряжение U_1^* ослабевает.

При сохранении условий охлаждения внешней поверхности полого цилиндра ($R = 5 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$), но увеличении теплового потока, подводимого к внутренней поверхности цилиндра, напряжение U_1^* уменьшается, температура T_0 увеличивается. При этом увеличивается влияние на значение U_1^* теплопроводности поликарбоната. В случае если произведение параметров R и Q не меняется ($R = 11 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$, $Q = 5 \text{ Вт/м}$), увеличение T_1 приводит к дальнейшему уменьшению напряжения U_1^* , однако в этом случае при некотором увеличении T_1^* уменьшаются также значения T_0^* (кривые 7, 8). Для сравнения на рис. 5

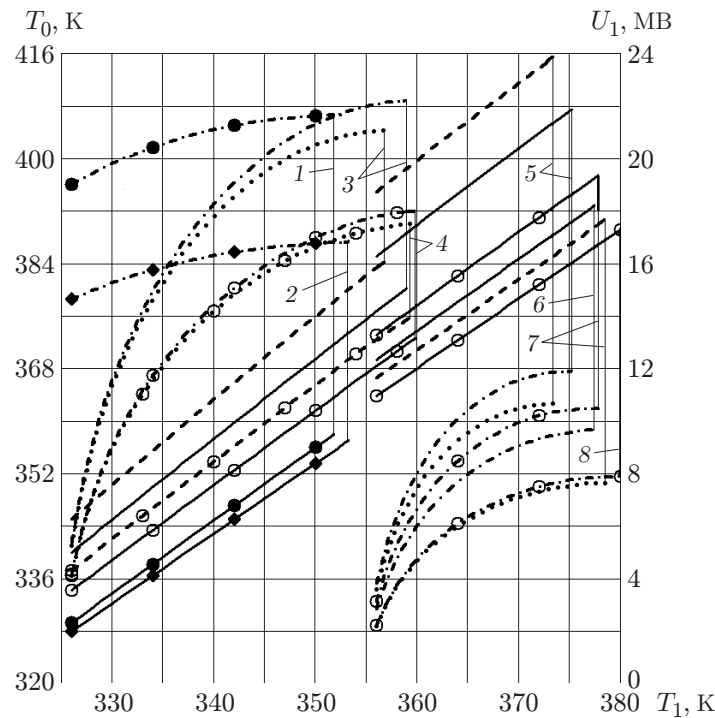


Рис. 5. Зависимости температуры T_0 внутренней поверхности цилиндра из поликарбоната (сплошные и штриховые линии) и электрического потенциала U_1 (штрихпунктирные и пунктирные линии) от температуры T_1 внешней поверхности цилиндра при различных значениях параметров R, Q, r^* :

1 — $R = 11 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$, $Q = 0$, $r^* = 2$; 2 — $R = 11 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$, $Q = 0$, $r^* = 1,5$; 3 — $R = 5 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$, $Q = 5 \text{ Вт/м}$, $r^* = 2$; 4 — $R = 5 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$, $Q = 5 \text{ Вт/м}$, $r^* = 1,5$; 5 — $R = 5 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$, $Q = 11 \text{ Вт/м}$, $r^* = 2$; 6 — $R = 5 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$, $Q = 11 \text{ Вт/м}$, $r^* = 1,5$; 7 — $R = 11 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$, $Q = 5 \text{ Вт/м}$, $r^* = 2$; 8 — $R = 11 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$, $Q = 5 \text{ Вт/м}$, $r^* = 1,5$; сплошные и штрихпунктирные линии — верхняя граница, штриховые и пунктирные — нижняя граница

приведены результаты расчета при $R = 11 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$ в случае идеальной теплоизоляции внутренней поверхности цилиндра ($Q = 0$) (кривые 1, 2). Видно, что наряду с существенным увеличением напряжения U_1^* не только значительно уменьшаются параметры T_1^* , T_0^* , но и разность $T_0^* - T_1^*$ составляет лишь несколько кельвинов.

В отличие от поликарбоната политетрафторэтилен сохраняет работоспособность в более широком интервале температур, а при температуре порядка 300 К его электросопротивление как минимум на два порядка больше электросопротивления поликарбоната (см. рис. 2). Однако при более существенном уменьшении с ростом температуры электросопротивления политетрафторэтилена при его использовании в качестве диэлектрика температурное состояние полого цилиндра имеет ряд особенностей. В частности, при увеличении произведения RQ температура T_1^* увеличивается менее интенсивно, чем в случае поликарбоната, однако более быстро уменьшается значение U_1^* и увеличивается разность температур $T_0^* - T_1^*$ (рис. 6).

Заметим, что при фиксированном сочетании параметров R, Q, r^* температура T_1^* слабо зависит от теплопроводности политетрафторэтилена. Например, при $RQ = 75 \text{ К}$ (рис. 7) значение T_1^* можно считать практически постоянным во всем интервале изменения теплопроводности и приближенно равным 383 К. Для того же значения произведения RQ , но с противоположными значениями множителей на рис. 8 представлены распреде-

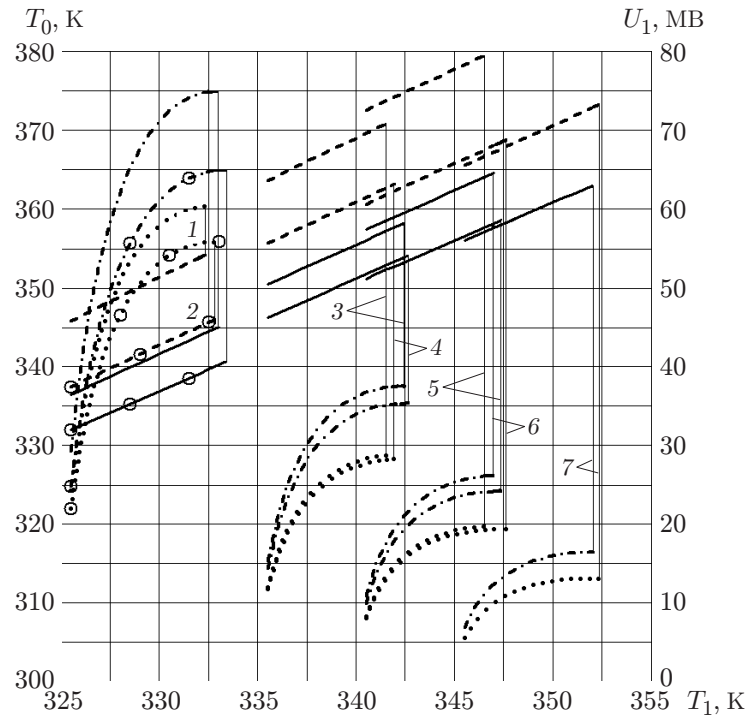


Рис. 6. Зависимости температуры T_0 внутренней поверхности цилиндра из политетрафторэтилена (сплошные и штриховые линии) и электрического потенциала U_1 (штрихпунктирные и пунктирные линии) от температуры T_1 внешней поверхности цилиндра при различных значениях параметров R , Q , r^* :

1 — $R = 5 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$, $Q = 5 \text{ Вт/м}$, $r^* = 2$; 2 — $R = 5 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$, $Q = 5 \text{ Вт/м}$, $r^* = 1,5$; 3 — $R = 5 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$, $Q = 7 \text{ Вт/м}$, $r^* = 2$; 4 — $R = 7 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$, $Q = 5 \text{ Вт/м}$, $r^* = 2$; 5 — $R = 5 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$, $Q = 8 \text{ Вт/м}$, $r^* = 2$; 6 — $R = 8 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$, $Q = 5 \text{ Вт/м}$, $r^* = 2$; 7 — $R = 9 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$, $Q = 5 \text{ Вт/м}$, $r^* = 2$; сплошные и штрихпунктирные линии — верхняя граница, штриховые и пунктирные — нижняя граница

ления по толщине ζ полого цилиндра температуры T и безразмерного модуля вектора напряженности электрического поля E^* . В данном случае большее, чем для поликарбоната, влияние температуры на электросопротивление политетрафторэтилена привело к существенно неравномерному распределению $E^*(\zeta)$ даже по сравнению с распределением, соответствующим случаю, когда электросопротивление диэлектрика не зависит от температуры (кривая 3 на рис. 8). Однако при этом в области, примыкающей к наиболее нагретой внутренней поверхности полого цилиндра, $E^* < 1$, поскольку с увеличением температуры уменьшается так называемая электрическая прочность практически всех полимерных диэлектриков [1, 3, 6].

Заключение. С использованием сформулированной нелинейной математической модели установившейся теплопроводности в полом круговом цилиндре из полимерного диэлектрика при постоянной разности электрических потенциалов на поверхностях цилиндра построены интегральные соотношения, позволившие по известным зависимостям электросопротивления и теплопроводности полимера от температуры рассчитать распределения температуры и абсолютного значения напряженности электрического поля. С помощью количественного анализа интегральных соотношений сформулированы условия возникновения теплового пробоя цилиндрического слоя диэлектрика. Эти условия соответствуют достижению максимума (см. рис. 3, 5–7) зависимости абсолютного значения

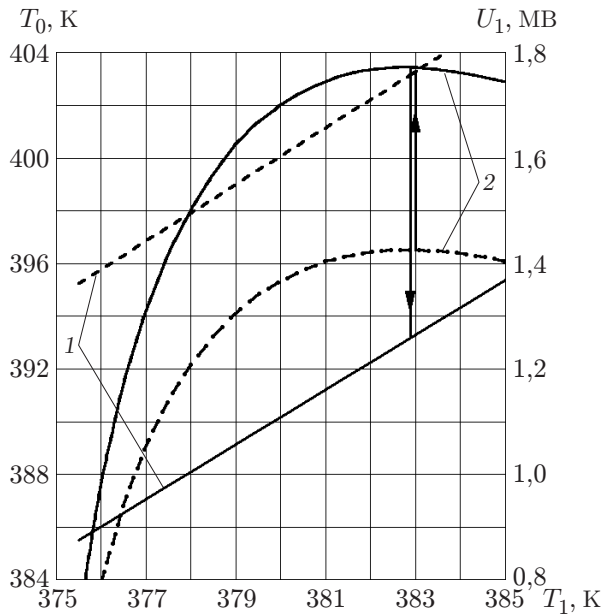


Рис. 7

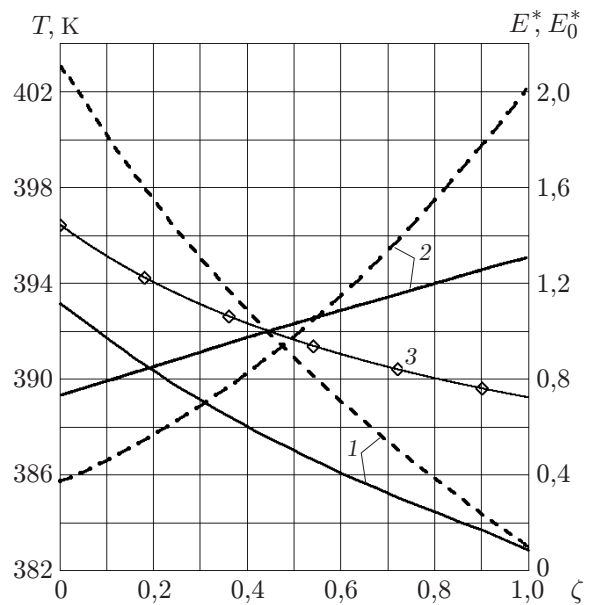


Рис. 8

Рис. 7. Зависимости температуры T_0 внутренней поверхности (1) цилиндра из политетрафторэтилена и электрического потенциала U_1 (2) от температуры T_1 внешней поверхности цилиндра при $R = 15 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$, $Q = 5 \text{ Вт/м}$, $r^* = 2$: сплошные линии — верхняя граница, штриховые — нижняя граница

Рис. 8. Распределения по толщине цилиндра из политетрафторэтилена температуры T (1) и безразмерных значений модуля вектора напряженности электрического поля E^* (2) и E_0^* (3) при $R = 15 \text{ м} \cdot \text{К/Вт}$, $Q = 5 \text{ Вт/м}$, $r^* = 2$: сплошные линии — верхняя граница, штриховые — нижняя граница

разности электрических потенциалов на поверхностях слоя от температуры его внешней поверхности.

Полученные результаты позволяют оценить целесообразность использования в проектируемых электротехнических устройствах конкретного полимерного материала в качестве диэлектрика. В частности, одним из перспективных направлений является использование полимерных диэлектриков в качестве электроизоляции в высоковольтных кабелях постоянного напряжения, обеспечивающих передачу электроэнергии на более значительные расстояния по сравнению со случаем передачи электроэнергии кабелями переменного напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Schramm R. E.** A compilation and evaluation of mechanical, thermal and electrical properties of selected polymers / R. E. Schramm, A. F. Clark, R. P. Reed. Boulder: Nat. Bureau of Standards, 1973.
2. **Тареев Б. М.** Физика диэлектрических материалов. М.: Энергоатомиздат, 1982.
3. **Электрические** свойства полимеров / Под ред. Б. И. Сажина. Л.: Химия, 1986.
4. **Physical** properties of polymers: Handbook / Ed. by J. E. Mark. N. Y.: Springer, 2007.
5. **Properties** and behavior of polymers. 2 volume set / Ed. by J. Bailey. Hoboken: Wiley and Sons Inc., 2011.

6. **Воробьев Г. А.** Физика диэлектриков (область сильных полей) / Г. А. Воробьев, Ю. П. Похолков, Ю. Д. Королев, В. И. Меркулов. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2003.
7. **Пробой** диэлектриков. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://www.websor.ru/proboi-dielektrikov>.
8. **Дмитревский В. С.** Расчет и конструирование электрической изоляции. М.: Энергоиздат, 1981.
9. **Ларина Э. Т.** Силовые кабели и кабельные линии. М.: Энергоатомиздат, 1984.
10. **Справочник** по кабелю. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://proelectro.ru/spravochnik-po-kabelyu>.
11. **Зарубин В. С.** Моделирование. М.: Академия, 2013.
12. **Зарубин В. С., Кувыркин Г. Н., Савельева И. Ю.** Вариационный вариант модели теплового пробоя слоя твердого диэлектрика при постоянном напряжении // Радиооптика. 2016. № 5. С. 38–50. DOI: 10.7463/rdopt.0516.0848088.
13. **Зарубин В. С.** Инженерные методы решения задач теплопроводности. М.: Энергоатомиздат, 1983.
14. **Новиченок Л. Н.** Теплофизические свойства полимеров / Л. Н. Новиченок, З. П. Шульман. Минск: Наука и техника, 1971.
15. **Rule D. L.** Thermal conductivity of a polyimide film between 4.2 and 300 K, with alumina particles as filler / D. L. Rule, D. R. Smith, L. L. Sparks. Boulder: Nat. Inst. Standards and Technol., 1990.

*Поступила в редакцию 31/І 2018 г.,
после доработки — 19/V 2018 г.
Принята к публикации 3/ІХ 2018 г.*
