

Научная статья

УДК 621.315.61: 51-74

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18209>

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПОЛИМЕРОВ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ТЕОРИИ КАТАСТРОФ

В. В. Киселевич 

Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого,
г. Гомель, Беларусь

 valentinkis@list.ru

Аннотация. В рамках математической теории катастроф получено уравнение зависимости электрической долговечности полимерных диэлектриков от величины напряженности приложенного электрического поля. Выполнена количественная оценка параметров данного уравнения для бумажной, эпоксидной и полиэтилентерефталатной электроизоляции. Установлено хорошее согласие между опубликованными экспериментальными данными и полевыми зависимостями электрической долговечности полимеров, построенными по предложенному уравнению. Проанализированы геометрические образы функции катастрофы складки, отражающие характер изменения безразмерного параметра скорости накопления повреждений в пленке полиэтилентерефталата при варьировании напряженности электрического поля.

Ключевые слова: полимерный диэлектрик, электрическая долговечность, электрический пробой, напряженность электрического поля, теория катастроф, катастрофа складки

Для цитирования: Киселевич В. В. Электрическая долговечность полимеров с точки зрения теории катастроф // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2025. Т. 18. № 2. С. 93–108. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18209>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18209>

AN ELECTRICAL LIFETIME OF POLYMERS IN TERMS OF THE CATASTROPHE THEORY

V. V. Kiselevich 

Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi, Gomel, Belarus

 valentinkis@list.ru

Abstract. The present study analyzes the known expressions establishing exponential and power relationships between the lifetime of polymer dielectrics and the strength of the electric field acting on them. The work notes the necessity of mathematical substantiation of the known power expression for the field dependence of electrical lifetime. We obtained the equation of dependence of the electrical lifetime of polymeric dielectrics on the value of the applied electric field strength within the framework of the mathematical catastrophe theory. The study has the performance of quantitative estimation of the parameters of this equation for paper, epoxy and polyethylene terephthalate electrical insulation. We established a good agreement between the literature experimental data and the field dependences of the electrical lifetime of polymers plotted by the proposed equation. The study analyses geometric images of the fold catastrophe function reflecting the nature of the change in the dimensionless parameter of the rate of damage accumulation in a polyethylene terephthalate film under varying electric field strength. The paper shows the prospect of using the mathematical apparatus of catastrophe theory to describe experimental regularities of changes in the electrical strength properties of polymer dielectrics in strong electric fields.

Keywords: polymer dielectric, electrical lifetime, electrical breakdown, electric field strength, catastrophe theory, fold catastrophe

For citation: Kiselevich V. V., An electrical lifetime of polymers in terms of the catastrophe theory, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 18 (2) (2025) 93–108. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18209>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Процесс эксплуатации высоковольтных электротехнических установок предполагает нахождение их изоляции под действием сильного электрического поля. Разрушающее действие поля со временем приводит к пробое изоляции, наступление которого является одной из главных причин преждевременного отказа большинства высоковольтных электроустановок [1 – 3]. Поэтому изучение закономерностей пробоя диэлектриков и способов его предупреждения является крайне актуальной задачей [4, 5], особенно в свете современных тенденций повышения требований к надежности установок высокого напряжения [6, 7].

В настоящее время установлено, что электрическое разрушение полимерных материалов имеет кинетическую природу и представляет собой процесс постепенного накопления повреждений макромолекул, по завершении которого происходит полная потеря изоляционных свойств материала, т. е. наступает электрический пробой [4, 8]. Основным параметром, характеризующим электропрочностные свойства полимерных диэлектриков, служит электрическая долговечность – период времени от начала приложения напряжения к диэлектрику до момента его пробоя [9, 10]. В научных публикациях, посвященных изучению поведения диэлектриков в сильных электрических полях, большое внимание уделяется установлению закономерностей изменения электрической долговечности при варьировании толщины образцов [10, 11], температуры окружающей среды [12 – 14] и напряженности прикладываемого поля [3, 15, 16].

Описание полевых зависимостей электрической долговечности, как правило, проводят с использованием экспоненциального [2, 9, 10, 16] и обратного степенного [1 – 3, 17] законов. Применение экспоненциального закона для моделирования полевой зависимости электрической долговечности полимеров непосредственно связано с физическим процессом накопления в них повреждений под действием электрического поля (термофлуктуационным распадом молекулярных ионов), поскольку скорость данного процесса экспоненциально зависит от напряженности этого поля [8, 18]. Помимо наличия строгого теоретического обоснования, использование экспоненциальных выражений обеспечивает высокую точность получаемых значений электрической долговечности [4, 10, 16].

Степенные зависимости приобрели широкое распространение для оценки долговечности полимерных материалов, выполняемой в рамках технических испытаний [16]. Однако, несмотря на математическую простоту степенных выражений, их применение для моделирования полевых зависимостей электрической долговечности полимеров не имеет физического обоснования. Также известны работы [19, 20], где экспериментальные полевые зависимости долговечности были описаны соотношениями, представляющими собой суперпозицию экспоненциального и степенного законов. Увеличение числа значимых параметров в таких составных соотношениях, с одной стороны, способствует повышению точности определения электрической долговечности, а с другой – наоборот, приводит к усложнению формы [21 – 23] и, как следствие, к снижению практической ценности этих соотношений.

Одним из возможных путей решения данной проблемы может быть применение теории катастроф [24], феноменологическая природа которой позволяет получать достаточно простые математические выражения, отражающие особенности поведения физических и технических систем различной сложности при варьировании управляющих параметров, характеризующих эти системы. Важным аргументом в пользу привлечения методов теории катастроф для исследования электропрочностных свойств полимеров служит



внезапность наступления пробоя полимерных диэлектриков и его катастрофический характер [25]. Вместе с тем работы, где изучение процессов разрушения полимерных материалов проводилось с использованием математического аппарата теории катастроф, весьма малочисленны [26 – 29], а публикации, в которых бы эта теория применялась для описания полевой зависимости электрической долговечности полимеров, и вовсе нам неизвестны. Полагаем, что восполнение данного пробела имеет большое научное и практическое значение.

Цель настоящего исследования – уточнить характер влияния напряженности электрического поля на величину долговечности полимерных диэлектриков.

Для достижения поставленной цели возникла идея использовать теорию катастроф. При этом встала первоочередная задача – вывести с этих позиций уравнение, описывающее зависимость электрической долговечности полимерных диэлектриков от величины напряженности приложенного электрического поля, и определить параметры этого уравнения для широко используемых диэлектриков: бумажной, эпоксидной и полиэтилентерефталатной (ПЭТФ) изоляции.

Постановка задачи

Ключевым проявлением кинетического характера электрического разрушения полимеров выступает тот факт, что их долговечность t_{br} существенно зависит от напряженности E приложенного электрического поля [8, 10]. В связи с этим большое число исследований, посвященных изучению электропрочностных свойств полимерных диэлектриков, направлено на получение полевой зависимости $t_{br} = f(E)$ электрической долговечности.

На практике для установления взаимосвязи $t_{br} = f(E)$ проводят серию опытов по измерению долговечности t_{br} при различных фиксированных значениях напряженности $E = U/d$, где U – постоянное либо переменное напряжение, прикладываемое к образцу диэлектрика толщиной d . При этом для испытаний, выполняемых в переменном электрическом поле, в качестве величины U обычно принимают амплитудное либо среднеквадратичное значение переменного напряжения [3, 4].

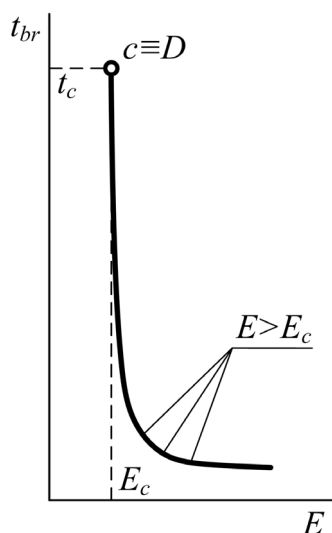


Рис. 1. Характерный вид полевой зависимости электрической долговечности полимерных диэлектриков t_{br} ;

E_c – значение E , при котором t_{br} существенно превышает период эксперимента; t_c – значение t_{br} при $E = E_c$; тождество $c \equiv D$ выражает соответствие между физической критической точкой c и вырожденной математической точкой D (см. пояснения в тексте)

Долговечность полимеров, помещенных в переменное электрическое поле, приблизительно на два порядка меньше величины t_{br} для постоянного поля [4]. Между тем экспериментальные полевые зависимости долговечности, измеренные в постоянном и переменном электрических полях, демонстрируют практически идентичное поведение [2 – 4, 9, 10], что позволяет исследовать общие закономерности их изменения с единых позиций. Типичная зависимость $t_{br} = f(E)$, характер поведения которой согласуется с известными опытными данными, представлена на рис. 1.

Видно, что при нахождении диэлектрика в поле напряженностью $E > E_c$ имеет место обратно пропорциональная зависимость между t_{br} и E . Через E_c на рис. 1 обозначена напряженность поля, при которой время t_{br} ожидания пробоя (долговечность диэлектрика) заметно превышает период проведения эксперимента. Опыты по определению долговечности обычно проводятся при значениях напряженности поля, обеспечивающих регистрацию пробоя диэлектрика во временном интервале от 1 до 10^6 с [30]. С учетом этого обстоятельства значение E_c может находиться в диапазоне от

нескольких единиц до нескольких десятков МВ/м, в зависимости от типа и состояния образца полимерного диэлектрика, а также условий его испытаний [1 – 3]. В первом приближении в качестве E_c можно использовать величину допустимой рабочей напряженности электрического поля [3, 31], отвечающей заданному ресурсу диэлектрического материала.

При малых значениях напряженности прикладываемого поля, когда $E \approx E_c$ (см. рис. 1), прослеживается заметное усиление полевой зависимости $t_{br} = f(E)$, вследствие чего долговечность $t_{br} = t_c$ становится довольно большой и теоретически стремится к бесконечности. Такое поведение функции $t_{br} = f(E)$ связано с тем, что при $E \approx E_c$ скорость процесса накопления повреждений настолько мала, что незначительное разрушающее действие электрического поля вообще не вызывает пробоя полимерного диэлектрика и он сохраняет свои изоляционные свойства в течение длительного времени.

Моделирование закономерностей изменения долговечности диэлектрических материалов при варьировании напряженности электрического поля, основанное на учете физического механизма накопления повреждений в диэлектрике, приводит к экспоненциальному виду полевой зависимости $t_{br} = f(E)$. Для полимерных диэлектриков эта зависимость была получена в следующей форме [18, 30]:

$$t_{br} = t_0 \exp\left(\frac{W^+ - el_0 qE}{k_B T}\right), \quad (1)$$

где t_0 , с, – предэкспоненциальный множитель, имеющий смысл периода колебаний атомов в твердых телах, $t_0 \approx 10^{-13} - 10^{-12}$ с; W^+ , Дж, – энергия диссоциации связей в молекулярных ионах; e , Кл, – заряд электрона; l_0 , м, – активационная длина; q – коэффициент электрических перенапряжений, характеризующий степень усиления поля вблизи неоднородностей на электродах; k_B , Дж/К, – постоянная Больцмана; T , К, – температура.

Накопление повреждений, способных привести к пробое диэлектрика, авторы статей [18, 30] связывают с двухступенчатым процессом распада полимерных макромолекул в электрическом поле. На первой ступени имеет место полевая ионизация макромолекул с образованием положительных молекулярных ионов (макроионов), энергия разрыва химических связей которых понижена [8, 18]. На второй ступени происходит термофлуктуационный распад макроионов, сопровождаемый появлением новых макроионов и химически активных свободных макрорадикалов [8, 18]. Постепенное накопление дефектов (повреждений) в процессе распада макромолекул вызывает увеличение концентрации носителей заряда (квазисвободных электронов и дырок), по достижении критического значения N_c которой и происходит пробой [4, 8]. Изменение напряженности электрического поля позволяет контролировать кинетику процесса накопления концентрации N_c , а следовательно, варьировать величину электрической долговечности полимеров [4, 8].

Экспоненциальное уравнение (1), полученное в рамках физической модели [18], демонстрирует высокую точность теоретических значений долговечности t_{br} и высокую степень их корреляции с экспериментальными данными для широкого круга полимерных диэлектриков [9, 10].

Наряду с аналитическими выражениями, подобными уравнению (1), для отражения количественной взаимосвязи между t_{br} и E , наблюдаемой в сильных электрических полях, на практике часто используют эмпирическую зависимость вида [2]:

$$t_{br} = a(E - E_c)^{-b}, \quad (2)$$

где a , b – параметры, зависящие от типа изоляции.

Простая математическая форма степенного выражения (2) послужила главной причиной его широкого применения для оценки значений t_{br} при проведении технических испытаний полимерной изоляции [3, 16], не позволяющих осуществлять точную постановку эксперимента. Вместе с тем известно [2, 3], что использование степенной зависимости (2), во-первых, физически не обосновано, во-вторых, приводит к математической абстракции $t_{br} \rightarrow \infty$ при $E = E_c$, хотя в действительности интервал времени от момента подачи напряжения на диэлектрик до наступления его пробоя является конечным.

Исходя из этого, можно заключить, что получение аналитического уравнения полевой зависимости $t_{br} = f(E)$, свободного от указанных недостатков выражения (2), есть актуальная задача. Для ее решения воспользуемся методами теории катастроф [24].



Основные положения теории катастроф

Для исследования физических систем в теории катастроф используют потенциальные функции Φ (функции катастроф), вид которых определяется числом n переменных состояния x и числом k параметров управления A . Переменные x , характеризующие состояние исследуемой системы, зависят от управляющих параметров A . При этом плавному изменению A может отвечать как непрерывное, так и скачкообразное (катастрофическое) изменение x . Именно поэтому скачкообразный отклик системы на плавное изменение ее управляющих параметров называют катастрофой.

При $k > 3$ математическое описание катастроф становится довольно громоздким и затрудняется визуальное представление геометрических характеристик потенциальных функций Φ . Для многих практических приложений достаточно ограничиться рассмотрением функций катастроф с одной переменной состояния и числом управляющих параметров, не превышающим трех. Известное выражение для функции Φ катастрофы с одной переменной состояния x имеет следующий вид [24]:

$$\Phi(x; A_i) = x^{k+2}/(k+2) + \sum_{i=1}^k A_i x^i/i, \quad (3)$$

где i – номер управляющего параметра A , $i \in [1, k]$; $k = 1, 2$ и 3 для катастроф типа складки, сборки и ласточкина хвоста соответственно.

Качественные изменения исследуемой системы определяются числом и типом критических точек функции катастрофы. Поэтому основу теории катастроф составляет анализ поведения функции Φ в окрестности критических точек. Для определения положений критических точек и значений функции Φ в этих точках решают уравнения, получаемые путем приравнивания нулю ее производных по переменной состояния x [24]:

$$\partial\Phi/\partial x = 0; \partial^2\Phi/\partial x^2 \neq 0; \quad (4)$$

$$\partial\Phi/\partial x = 0; \partial^m\Phi/\partial x^m = 0, \quad (5)$$

где m – степень производной, $m \in [2, k+1]$.

Точки, найденные из условий (4), называют невырожденными критическими точками; в физических приложениях математический термин «невырожденная критическая точка» соответствует определению точки равновесия. Решениям уравнений (5) отвечают вырожденные критические точки с кратностью вырождения m , тождественные физическим критическим точкам [24]. Вырожденные критические точки являются более информативными, по сравнению с невырожденными, так как именно в окрестности вырожденных точек существует высокая вероятность скачкообразного изменения состояния исследуемой системы – наступления катастрофы.

Предметом теории катастроф является изучение особенностей изменения состояний равновесия $x(A_i)$ потенциальной функции $\Phi(x; A_i)$, задаваемых уравнением (4), при варьировании управляющих параметров A_i .

Теория катастроф оперирует безразмерными математическими параметрами, т. е. числами, которые могут принимать как положительные, так и отрицательные значения. Поэтому для обеспечения возможности применения этой теории в физических приложениях необходимо поставить в соответствие безразмерным математическим параметрам, входящим в уравнение (3), размерные величины, характеризующие тот или иной физический процесс. Переход от размерных физических величин x' и A'_i к соответствующим им безразмерным математическим параметрам x и A_i осуществляется с использованием нормировочных соотношений [24]:

$$x = x'/x_D - 1; A_i = A'_i/A_{D(i)} - 1, \quad (6)$$

где x' – физическая переменная состояния; A'_i – i -й физический управляющий параметр; x_D , $A_{D(i)}$ – критические параметры функции катастрофы, под которыми понимают значения величин x' и A'_i в физической критической точке, отождествляемой с математической точкой D_{k+1} .

Точка D_{k+1} представляет собой вырожденную точку наибольшей кратности $m_{\max} = k + 1$ (для катастроф складки, сборки и ласточкина хвоста кратность $m_{\max}$ соответственно равна 2, 3 и 4).

Наличие в выражениях (6) сдвигающего члена, равного единице, приводит к тому, что по достижении физическими величинами x' и A'_i критических значений x_D и $A_{D(i)}$ математические параметры x и A_i принимают нулевые значения. Благодаря этому вырожденные критические точки D_2 , D_3 и D_4 , выступающие средоточием математических катастроф складки, сборки и ласточкина хвоста, всегда расположены в начале координат, что существенно упрощает анализ этих катастроф.

Анализ физических систем, процессов либо явлений (далее систем) в русле теории катастроф целесообразно проводить, следуя нижеприведенному алгоритму действий.

Шаг 1. Задать переменную состояния x' и параметры управления A'_i , описывающие рассматриваемую физическую систему.

Шаг 2. Опираясь на известные экспериментальные и теоретические закономерности поведения переменной x' , определить общий характер ее изменения при варьировании параметров A'_i .

Шаг 3. Выявить характерные признаки – флаги катастроф [24], по которым можно судить о присутствии катастрофы в рассматриваемой системе.

Шаг 4. Установить событие, отождествляемое с катастрофой, и определить критические параметры x_D и $A_{D(i)}$, по достижении которых отчетливо проявляются наиболее характерные изменения системы.

Шаг 5. Основываясь на взаимосвязи x и A_i , вытекающей из уравнений (3) и (4), и на анализе зависимости x' от A'_i , выполненном на шаге 2, поставить в соответствие безразмерным параметрам x и A_i размерные физические величины x' и A'_i .

Шаг 6. Применяя соотношения (6), привести величины x' и A'_i к безразмерному виду и, отталкиваясь от общего выражения (3), записать уравнение функции Φ , моделирующей исследуемую систему. Исходя из специфики соответствия между x , A_i и x' , A'_i , принятого на шаге 5, и соображений алгебраического удобства, в уравнение, полученное для функции катастрофы, можно ввести множители для изменения масштаба и обращения знака математических параметров.

Шаг 7. Определить число и тип критических точек функции катастрофы Φ , а также проанализировать геометрические свойства функции Φ и ее производных.

Шаг 8. Используя пересчетные соотношения (6), представить уравнение $\partial\Phi/\partial x = 0$ в физических обозначениях и привести его к искомой зависимости $x' = f(A'_i)$.

Чтобы изложить материал в форме, сообразной вышеприведенному алгоритму, ниже представим вывод уравнения, описывающего полевую зависимость $t_{br} = f(E)$ электрической долговечности полимерных диэлектриков.

Теоретический анализ поведения диэлектрика в сильном электрическом поле

Вначале зададим физические параметры состояния и управления, определяющие электропрочностные свойства полимерного диэлектрика в условиях постоянной температуры. В роли переменной состояния предварительно примем электрическую долговечность t_{br} , а напряженность E электрического поля, приложенного к диэлектрику, будем считать физическим управляющим параметром.

Далее выявим характерные признаки, указывающие на возможность наступления катастрофы в диэлектрике, подвергнутом воздействию сильного электрического поля.

В качестве первого признака вероятной катастрофы можно принять факт существования критической концентрации N_c зарядов, время накопления которой тождественно электрической долговечности t_{br} полимерного диэлектрика. Результаты исследований, представленные в работах [4, 8], где была установлена данная закономерность, показывают, что величина $N_c \approx 10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Вторым признаком катастрофы выступает аномальная дисперсия экспериментальных значений электрической долговечности t_{br} , наблюдаемая при действии на диэлектрик малых значений напряженности, сопоставимых со значением E_c . Действительно, как было отмечено выше, при $E \approx E_c$ полевая зависимость $t_{br} = f(E)$ заметно усиливается и, в сущности, вырождается в почти вертикальную прямую (см. рис. 1). Малые вариации



напряженности E вблизи E_c приводят к большим изменениям долговечности t_{br} , вследствие чего на практике имеет место большой разброс значений t_{br} , измеряемых при $E \approx E_c$ [1 – 3].

Событием, эквивалентным наступлению математической катастрофы, будем считать момент накопления критической концентрации повреждений (что равносильно достижению N_c) в полимерном диэлектрике, находящемся в поле напряженностью E_c . Точку c на рис. 1, в окрестности которой происходит вырождение полевой зависимости электрической долговечности, положим в качестве физической критической точки. Затем, следуя приведенному выше алгоритму, поставим в соответствие физической критической точке c вырожденную математическую точку D . Тогда физические параметры t_c и E_c , отнесенные к точке c , станут равносильными критическим параметрам функции катастрофы: $t_c \equiv t_D$ и $E_c \equiv E_D$.

Для описания рассматриваемой системы (системы с одним управляющим параметром) воспользуемся уравнением катастрофы типа складки, вытекающим из общего выражения (3) при $k = 1$ [24]:

$$\Phi(x; A_1) = x^3/3 + A_1 x. \quad (7)$$

Из уравнения (7) следует, что математический управляющий параметр A_1 пропорционален квадрату переменной состояния x : $A_1 \sim -x^2$. Поэтому, с учетом пропорциональности $1/t_{br} \sim E^b$, характерной для физических величин t_{br} и E , в качестве переменной состояния удобно принять напряженность поля E , а не долговечность t_{br} . Величину $v_{br} = 1/t_{br}$, обратную электрической долговечности, при дальнейшем анализе в русле теории катастроф будем считать физическим управляющим параметром. Критическое значение v_{br} в таком случае определится равенством $v_D = 1/t_D$. Согласно определению в статье [9], параметр v_{br} характеризует скорость процесса накопления повреждений, т. е. скорость подготовки полимерного диэлектрика к пробое.

Возможность взаимной замены физических параметров состояния x' и управления A' , которая, как в нашем случае (параметры t_{br} и E), может возникнуть при их подстановке в уравнение катастрофы, является еще одной сильной стороной применяемого подхода. Более того, такая замена будет правомерна даже тогда, когда физическую величину, принятую в качестве параметра управления, т. е. независимой переменной, невозможно напрямую варьировать в реальном эксперименте (в рассматриваемом случае это электрическая долговечность t_{br}), так как в математическом отношении безразлично, какая зависимость исследуется на практике: $x' = f(A')$ либо $A' = f(x')$.

Далее, используя нормировочные соотношения (6), приведем размерные физические величины E и v_{br} к безразмерному виду:

$$F_E = E/E_D - 1; v = v_{br}/v_D - 1 = t_D/t_{br} - 1, \quad (8)$$

где F_E – безразмерная напряженность электрического поля (математическая переменная состояния); v – безразмерная скорость накопления повреждений (математический параметр управления).

Принимая $x = F_E$ и $A_1 = -a_1 v$, из формулы (7) получим выражение для функции катастрофы складки, характеризующей состояние полимерного диэлектрика в сильном электрическом поле:

$$\Phi(F_E; v) = F_E^3/3 - a_1 v F_E, \quad (9)$$

где a_1 – положительный масштабный множитель, введенный в целях более наглядного представления геометрических характеристик функции Φ . Знак минус при a_1 взят с целью удобства проведения дальнейшего анализа функции Φ .

Приравняв нулю первую и вторую производные функции (9) по переменной F_E , запишем уравнения, определяющие положение критических точек этой функции:

$$\partial\Phi/\partial F_E = F_E^2 - a_1 v = 0; \quad (10)$$

$$\partial^2\Phi/\partial F_E^2 = 2F_E = 0. \quad (11)$$

Поскольку $a_i > 0$, при $v < 0$ уравнение (10) не имеет решений, а следовательно, функция катастрофы $\Phi(F_E; v)$ не имеет критических точек. При $v = 0$ уравнение (10) имеет один корень $F_E = 0$, а у функции $\Phi(F_E; v)$ есть одна критическая точка – точка перегиба, расположенная в начале координат. И в силу того, что в случае $v = 0$ одновременно выполняются уравнения (10) и (11), данная критическая точка является дважды вырожденной. При $v > 0$ уравнение (10) имеет два противоположных по знаку корня: $F_E = \pm(a_i v)^{1/2}$, а функция $\Phi(F_E; v)$ обладает двумя невырожденными критическими точками: точкой минимума при $F_E > 0$ и точкой максимума при $F_E < 0$.

Используя выражения пересчета (8), запишем соотношения, устанавливающие соответствие между характерными значениями безразмерных математических параметров (F_E, v) и размерных физических величин (E, t_{br}):

$$\begin{aligned} F_E < 0 &\Leftrightarrow E < E_D; & F_E = 0 &\Leftrightarrow E = E_D; & F_E > 0 &\Leftrightarrow E > E_D; \\ v < 0 &\Leftrightarrow t_{br} > t_D; & v = 0 &\Leftrightarrow t_{br} = t_D; & v > 0 &\Leftrightarrow t_{br} < t_D. \end{aligned} \quad (12)$$

Учет соотношений (12) и анализ результатов уравнений (9) – (11) позволяет сделать следующие заключения.

В случае, когда к диэлектрику приложено электрическое поле напряженностью $E < E_D$, электрического пробоя не происходит, так как скорость накопления повреждений мала ($v < 0$), а время достижения критической концентрации N_c превышает t_D . При увеличении напряженности поля до уровня $E > E_D$ наблюдается заметный рост безразмерного параметра скорости ($v > 0$), вследствие чего электрическое разрушение диэлектрика протекает за время $t_{br} < t_D$. Равенство $E = E_D$, при котором имеет место вырождение полевой зависимости $t_{br} = f(E)$, соответствует условию наступления катастрофы – достижению критической величины N_c и пробоем диэлектрика за время $t_{br} = t_D$.

Подставив соотношения (8) в формулу (10), получим итоговое выражение полевой зависимости электрической долговечности полимерного диэлектрика:

$$t_{br} = \frac{t_D}{1 + a_i^{-1}(E/E_D - 1)^2}. \quad (13)$$

Уравнение (13) справедливо при $E \geq E_D$, т. е. когда электрическое разрушение диэлектрика происходит за время, не превосходящее t_D . Сильной стороной уравнения (13) является его структура, которая обеспечивает конечность значения электрической долговечности t_{br} при наведении в диэлектрике поля с напряженностью $E_D = E_c$.

Геометрия катастрофы складки

Профили $\Phi = f(F_E)$ функции катастрофы складки, отвечающие рассмотренным выше случаям изменения безразмерного параметра v , представлены на рис. 2. Номера $l \in [1, 5]$ профилей на рис. 2 соответствуют характерным значениям v_l этого параметра. Поскольку $v_1 < v_2 < 0$, кривые 1 и 2 не имеют критических точек. Кривая 3, построенная для $v_3 = 0$, имеет в начале координат вырожденную точку перегиба D_2 . Поскольку $v_5 > v_4 > 0$, на профилях 4 и 5 функции Φ присутствуют точки минимума и максимума, характеризующие устойчивые и неустойчивые состояния равновесия системы.

По мере роста математического управляющего параметра от v_1 до v_5 происходит постепенная трансформация профиля функции Φ , включающая следующие стадии:

- увеличение пологости кривой вблизи нуля,
- появление вырожденной точки,
- расщепление данной точки на равноудаленные от нее максимум и минимум,
- дальнейший рост амплитуд и расхождение этих экстремумов.

При уменьшении параметра управления от v_5 до v_1 максимум и минимум на профиле функции катастрофы сближаются, сливаются, образуя в начале координат вырожденную критическую точку, и исчезают. Дважды вырожденная точка D_2 , в окрестности которой обнаруживается бифуркация (раздвоение) решений, выступает центральным местом проявления катастрофы складки.

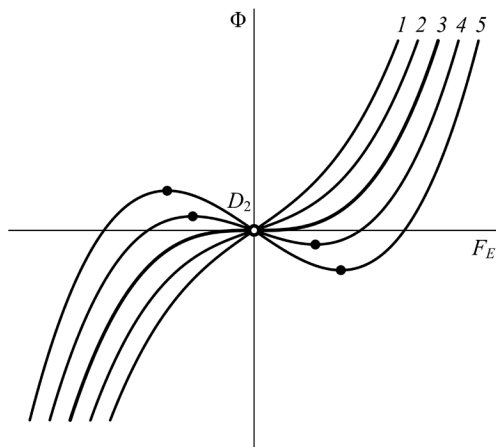


Рис. 2. Профили функции катастрофы складки для различных значений управляющего параметра. Номера профилей соответствуют характерным значениям параметра $\nu_1 - \nu_5$. Черными точками отмечены позиции минимумов и максимумов, характеризующие устойчивые и неустойчивые состояния равновесия системы; D_2 – вырожденная точка перегиба

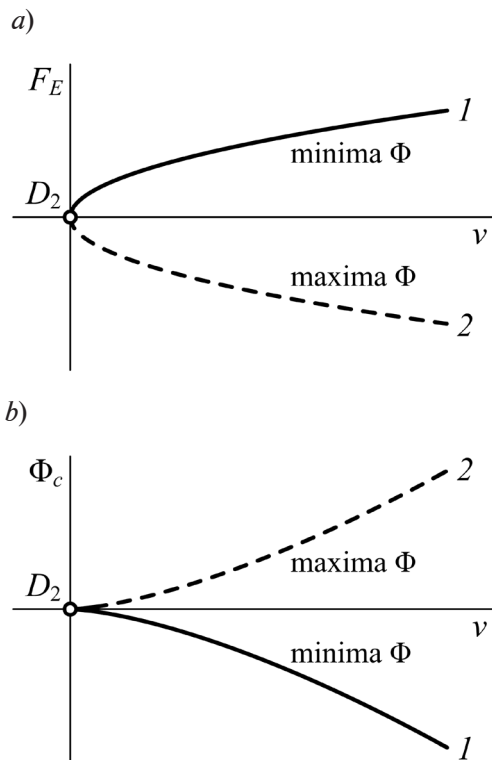


Рис. 3. Геометрия катастрофы складки: функция безразмерного параметра скорости накопления повреждений (a) и функция критических значений (b).

Представлены ветви устойчивого (1) и неустойчивого (2) равновесий, образованные соответственно минимумами и максимумами функции катастрофы Φ (см. рис. 2)

Геометрическое место критических точек, удовлетворяющих уравнению (10), представляет собой параболу, ветви которой сходятся в точке D_2 (рис. 3, a). Множество критических значений Φ_c функции катастрофы, определяемых при подстановке корней (10) в уравнение (9), образует геометрическую фигуру в форме клина с острием в точке D_2 (рис. 3, b).

Слева от точки D_2 нет ни одного состояния равновесия, а справа от нее расположены ветви устойчивого (1) и неустойчивого (2) равновесий, образованные соответственно минимумами и максимумами функции катастрофы Φ .

Из представленных на рис. 2 профилей $\Phi = f(F_E)$ следует, что увеличение параметра ν вызывает смещение минимума/максимума функции Φ в область больших положительных/отрицательных значений переменной состояния F_E и возрастание амплитуд данных экстремумов. Такое поведение Φ приводит к тому, что при повышении ν на устойчивых ветвях зависимостей $F_E = f(\nu)$ и $\Phi_c = f(\nu)$ (см. рис. 3) наблюдается увеличение F_E и уменьшение Φ_c , в то время как на неустойчивых ветвях данных зависимостей имеет место снижение F_E и повышение Φ_c .

Обсуждение результатов

Для проверки применимости уравнения (13) нами была проведена обработка экспериментальных данных, представленных в работах [1 – 3, 31 – 33] по исследованию полевых зависимостей электрической долговечности изоляционных материалов. Значения параметров a_r , E_D и t_D , полученные в результате этой обработки, сведены в таблицу.

Анализ данных таблицы позволяет заключить, что для бакелитовой, бумагомасляной и ПЭТФ изоляции характерны намного меньшие значения t_D , чем для эпоксидных диэлектриков. Это связано с тем, что исследование зависимости $t_{br} = f(E)$ для эпоксидных образцов выполнялось при более низких (по отношению к E_D) значениях напряженности поля, в силу чего в этих диэлектриках происходило замедление процессов накопления дефектов и, как следствие, увеличение электрической долговечности. Например, для компаунда ЭЗК-1 напряженность поля, при которой испытываемые образцы пробивались за время, не превышающее максимальное время испытаний (30 тыс. ч), составляла всего 2,5 МВ/м

Таблица

Значения параметров уравнения полевой зависимости долговечности для ряда электроизоляционных материалов

Электроизоляционный материал	Значение параметра уравнения (13)		
	$a_r, 10^{-4}$	$E_D, \text{МВ/м}$	$t_D, 10^7 \text{ с}$
Бакелизированная бумага	2,3270	13,05	0,1094
Конденсаторная бумага, пропитанная маслом	14,570	18,58	0,3507
Конденсаторная пленка ПЭТФ	22,180	24,16	0,0199
Эпоксидная смола	1,7910	4,59	1,0260
Эпоксидный компаунд ЭЗК-1	0,9673	2,32	29,230

[33]. Поэтому и оценочное значение электрической долговечности при напряженности $E = E_D = 2,32 \text{ МВ/м}$ получилось достаточно большим: $t_D = 29,23 \cdot 10^7 \text{ с} \approx 9,27 \text{ лет}$.

В качестве примера на рис. 4 проиллюстрированы графические зависимости $\Phi = f(F_E)$ и $F_E = f(A_{br})$ для ПЭТФ-изоляции, построенные по экспериментальным данным, взятым из работы [32]¹. На рис. 4 имеется обозначение A_{br} ; это масштабированный управляющий параметр, равный произведению безразмерной скорости накопления повреждений ν и масштабного множителя a_r , введенного ранее в уравнение (9): $A_{br} = a_r \nu$. Выполненные построения подтверждают высокую степень корреляции литературных экспериментальных данных и аппроксимирующей кривой для масштабированного параметра скорости накопления повреждений A_{br} . Пунктирная линия, описывающая снижение параметра A_{br} при повышении безразмерной напряженности F_E , отвечает множеству неустойчивых состояний функции Φ , не имеющему места в действительности. Это обстоятельство связано

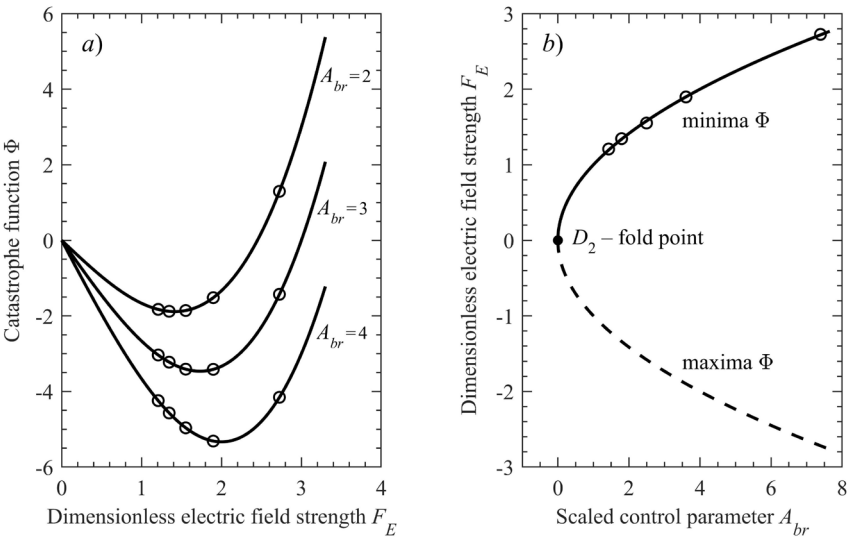


Рис. 4. Графики полевых зависимостей функции катастрофы складки Φ (a) и масштабированного параметра скорости накопления повреждений A_{br} (b) для ПЭТФ-изоляции (экспериментальные данные (они показаны символами) взяты из работы [32]); аппроксимирующие кривые (сплошные линии) отвечают физически реализуемым состояниям, а множество неустойчивых состояний функции Φ (пунктиры) не имеет места в действительности

¹ См. также: Емельянов О. А. Работоспособность металлоплёночных конденсаторов в форсированных электротепловых режимах: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2004. 246 л.



с тем, что увеличение напряженности поля, прикладываемого к диэлектрику при проведении эксперимента, приводит к уменьшению электрической долговечности t_{br} , равнозначному повышению A_{br} .

На графике рис. 4, *a* отчетливо прослеживаются рассмотренные выше закономерности поведения функции катастрофы, а именно: при возрастании масштабированного параметра A_{br} минимум функции Φ становится более глубоким и смещается в сторону больших значений F_E . Уменьшение A_{br} при понижении F_E (см. рис. 4, *b*) согласуется с наблюдаемым на практике ростом электрической долговечности t_{br} при уменьшении напряженности E . В точке D_2 безразмерный параметр A_{br} становится равным нулю, что связано с достижением величиной t_{br} критического значения t_D . При условии $A_{br} < 0$, равносильном неравенству $t_{br} > t_D$, процессы электрического разрушения, индуцированные действием поля небольшой напряженности, замедлены, вследствие чего пробоя диэлектрика не происходит, даже когда период проведения эксперимента заметно превышает критическую величину t_D .

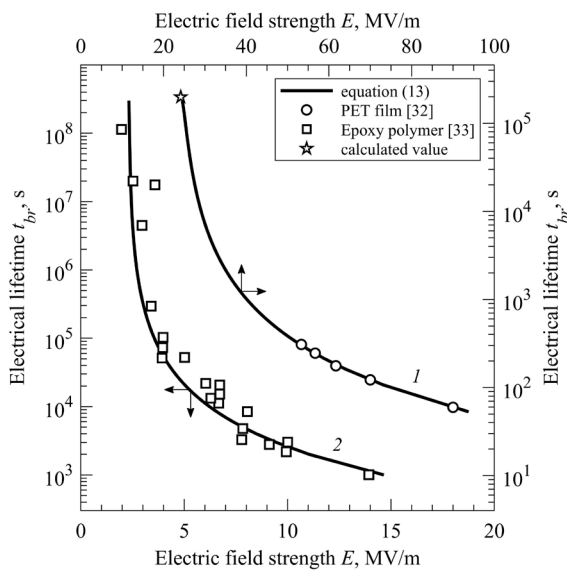


Рис. 5. Сравнение экспериментальных (символы) и теоретических (линии) полевых зависимостей электрической долговечности ПЭТФ (1) и эпоксидного компаунда (2).

Звездочкой обозначено расчетное значение t_D ПЭТФ-пленки, отвечающее дважды вырожденной математической точке D_2 (см. рис. 4, *b*)

развития электрического пробоя в реальных полимерных диэлектриках.

В завершение, используя аналитическое уравнение (1), выполним оценку коэффициента q перенапряжений для ПЭТФ-пленки, находящейся в электрическом поле напряженностью $E = E_D$. Для расчета примем следующие значения физических параметров:

$$t_0 = 10^{-13} \text{ с}, W^+ = 1,1 \text{ эВ}, l_0 = 1,5 \text{ Å} [8]; T = 293 \text{ К} [32];$$

$$E_D = 24,16 \text{ МВ/м}, t_D = 0,0199 \cdot 10^7 \text{ с (см. таблицу).}$$

В результате получим значение коэффициента $q \approx 9,7$, позволяющее предположить, что именно термофлуктуационный распад молекулярных ионов превалирует над прочими механизмами электрического разрушения конденсаторной пленки ПЭТФ [32]. Основанием для выдвинутого предположения могут служить два обстоятельства. Во-первых, согласно сведениям в статье [18], при значениях коэффициента усиления поля $q \approx 10$ в полимере создаются благоприятные условия для полевой ионизации макромолекул, которая (как

Полевые зависимости электрической долговечности, построенные по уравнению (13) для ПЭТФ (кривая 1) и эпоксидного компаунда ЭЗК-1 (кривая 2) в размерных координатах, представлены на рис. 5. Видно, что сплошные кривые 1 и 2 хорошо согласуются с опытными данными [32, 33]. Это подтверждает возможность применения уравнения (13) для описания полевых зависимостей $t_{br} = f(E)$ полимерных диэлектриков. Звездочкой на рис. 5 обозначено расчетное значение t_D электрической долговечности полиэтилентерефталатной пленки, отвечающее дважды вырожденной математической точке D_2 .

Некоторое расхождение между кривыми 1, 2 на рис. 5 и соответствующими им экспериментальными точками можно объяснить следующими причинами:

большой статистический разброс между экспериментальными значениями электрической долговечности, определяемыми для одного и того же значения напряженности поля;

сложность учета совокупного влияния различных факторов (например, температуры, частичных разрядов, степени неоднородности структуры и др.) на процесс раз-

отмечено выше) есть первая стадия двухступенчатого процесса разрыва этих макромолекул в сильном электрическом поле [8, 18]. Во-вторых, измерение полевой зависимости $t_{br} = f(E)$ в работе [32] проводилось при температуре 293 К, когда развитие теплового пробоя крайне маловероятно [34, 35].

Заключение

С позиций теории катастроф представлен вывод уравнения (13), описывающего зависимость электрической долговечности полимерных диэлектриков от величины напряженности воздействующего электрического поля. Дана количественная оценка параметров этого уравнения для широко применяемых электроизоляционных материалов: бакелизированной бумаги, эпоксидных компаундов, бумажно-пропитанной и ПЭТФ конденсаторной изоляции.

На примере ПЭТФ проанализированы основные геометрические свойства, определяющие характер поведения функции катастрофы складки и масштабированного параметра скорости накопления повреждений при варьировании безразмерной напряженности электрического поля. Построены графики полевых зависимостей электрической долговечности полиэтилентерефталата и эпоксидного компаунда ЭЗК-1. Установлена высокая степень корреляции между опубликованными экспериментальными данными и аппроксимирующими кривыми, отвечающими уравнению (13).

Полученные в статье результаты могут быть использованы для объяснения закономерностей изменения электрической долговечности, вытекающих из данных эксплуатации и технических испытаний полимерных диэлектриков, а также для прогнозирования явлений пробоя.

Преимущество использованного в работе подхода заключается в возможности модификации общего выражения (3) функции катастрофы $\Phi(x; A_i)$ при необходимости замены либо увеличения числа физических управляющих параметров, определяющих закономерности поведения диэлектрических материалов в сильных электрических полях.

В перспективе наших дальнейших исследований предполагается учесть влияние температуры эксплуатации изоляции на величину пробивной напряженности полимерных диэлектриков, что возможно при теоретическом рассмотрении катастрофы более высокого порядка – катастрофы сборки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисова М. Э., Койков С. Н. Физика диэлектриков. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1979. 240 с.
2. Dissado L. A., Fothergill J. C. Electrical degradation and breakdown in polymers (IEE Materials and Devices Series 9). London, UK: Peter Peregrinus Ltd., 1992. 601 p.
3. Ушаков В. Я. Изоляция установок высокого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1994. 496 с.
4. Закревский В. А., Пахотин В. А., Сударь Н. Т. Старение и разрушение (пробой) полимерных пленок в переменном электрическом поле // Физика твердого тела. 2019. Т. 61. № 10. С. 1953–1959.
5. Семенов С. Е., Капралова В. М., Пахотин В. А., Сударь Н. Т. Механизм развития импульсного пробоя в полимерных пленках // Физика твердого тела. 2022. Т. 64. № 8. С. 948–954.
6. Журавлева Н. М., Кизеветтер Д. В., Резник А. С., Смирнова Е. Г., Хрипунов А. К. Электрофизические характеристики бумажно-пропитанной изоляции при модификации целлюлозной основы биополимером // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 75–86.
7. Zhu M.-X., Song H.-G., Li J.-C., Yu Q.-C., Chen J.-M. Phase-field modeling of electric-thermal breakdown in polymers under alternating voltage // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2020. Vol. 27. No. 4. Pp. 1128–1135.
8. Закревский В. А., Сударь Н. Т. Ионизационный механизм электрического разрушения (пробоя) полимерных диэлектрических пленок // Физика твердого тела. 2013. Т. 55. № 7. С. 1298–1303.



9. **Закревский В. А., Сударь Н. Т.** Электрическое разрушение тонких полимерных пленок // Физика твердого тела. 2005. Т. 47. № 5. С. 931–936.
10. **Слуцкер А. И., Поликарпов Ю. И., Гиляров В. Л.** Об элементарных актах в кинетике электрического разрушения полимеров // Журнал технической физики. 2006. Т. 76. № 12. С. 52–56.
11. **Bhutta M. S., Yang L., Ma Z., Nazir M. T., Akram S., Mehmood M. A., Faiz N.** Simulation of thickness controlled DC breakdown of XLPE regulated by space charge & molecular chain movement // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2020. Vol. 27. No. 4. Pp. 1143–1151.
12. **Борисова М. Э., Марченко М. С.** Электрическая прочность пленок полиимида // Электротехника. 1998. № 5. С. 4–6.
13. **Сударь Н. Т.** Влияние температуры на пробивную напряженность полимеров в постоянном электрическом поле // Труды СПбГТУ. 2008. № 507. С. 275–279.
14. **Семенов С. Е.** Влияние температуры на импульсную электрическую прочность полимерных пленок // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2024. Т. 17. № 2. С. 141–149.
15. **Montanari G. C., Seri P., Dissado L. A.** Aging mechanisms of polymeric materials under DC electrical stress: A new approach and similarities to mechanical aging // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2019. Vol. 26. No. 2. Pp. 634–641.
16. **Bian H., Yang L., Ma Z., Deng B., Zhang H., Wu Z.** Improved physical model of electrical lifetime estimation for crosslinked polyethylene AC cable // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2020. Vol. 27. No. 1. Pp. 132–139.
17. **Hirose H.** A method to estimate the lifetime of solid electrical insulation // IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1987. Vol. EI-22. No. 6. Pp. 745–753.
18. **Закревский В. А., Слуцкер А. И.** Возможные механизмы распада макромолекул в механическом и электрическом полях // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 1984. Т. А 26. № 6. С. 1201–1206.
19. **Simoni L.** A general phenomenological life model for insulating materials under combined stresses // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1999. Vol. 6. No. 2. Pp. 250–258.
20. **Mazzanti G., Montanari G. C., Civenni F.** Model of inception and growth of damage from microvoids in polyethylene-based materials for HVDC cables. 2. Parametric investigation and data fitting // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2007. Vol. 14. No. 5. Pp. 1255–1263.
21. **Dissado L., Mazzanti G., Montanari G. C.** The incorporation of space charge degradation in the life model for electrical insulating materials // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 1995. Vol. 2. No. 6. Pp. 1147–1158.
22. **Mazzanti G., Montanari G. C., Civenni F.** Model of inception and growth of damage from microvoids in polyethylene-based materials for HVDC cables. 1. Theoretical approach // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2007. Vol. 14. No. 5. Pp. 1242–1254.
23. **Mazzanti G.** Life and reliability models for high voltage DC extruded cables // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2017. Vol. 33. No. 4. Pp. 42–52.
24. **Gilmore R.** Catastrophe theory for scientists and engineers. New York: Dover Publications, 1993. 666 p.
25. **Blythe T., Bloor D.** Electrical properties of polymers. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005. 490 p.
26. **Рудской А. И., Баурова Н. И.** Технологическая наследственность при производстве и эксплуатации конструкционных материалов // Технология металлов. 2019. № 2. С. 2–10.
27. **Баурова Н. И., Зорин В. А., Приходько В. М.** Оценка синергетического эффекта процесса накопления повреждений в полимерных материалах с использованием теории катастроф // Теоретические основы химической технологии. 2016. Т. 50. № 1. С. 122–128.
28. **Lu T., Cheng S., Li T., Wang T., Suo Z.** Electromechanical catastrophe // International Journal of Applied Mechanics. 2016. Vol. 8. No. 7. P. 1640005.
29. **Thete A., Geelen D., Van der Molen S. J., Tromp R. M.** Charge catastrophe and dielectric breakdown during exposure of organic thin films to low-energy electron radiation // Physical Review Letters. 2017. Vol. 119. No. 26. P. 266803.

30. Закревский В. А., Сударь Н. Т. Влияние объемного заряда на закономерности электрического разрушения полимеров // Журнал технической физики. 1996. Т. 66. № 4. С. 105–113.
31. Кучинский Г. С., Назаров Н. И. Силовые электрические конденсаторы. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1992. 320 с.
32. Емельянов О. А. Особенности работоспособности металлопленочных конденсаторов в форсированных режимах // Электротехника. 2002. № 4. С. 6–10.
33. Бобровская Л. Д. Оценка допустимых напряженностей электрического поля в эпоксидной изоляции // Электричество. 1981. № 7. С. 43–45.
34. Сканапи Г. И. Физика диэлектриков (область сильных полей). М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1958. 907 с.
35. Tsurimoto T., Nagao M., Kosaki M. Effect of oxidation on localized heat generation and dielectric breakdown of low-density polyethylene film // Japanese Journal of Applied Physics. 1995. Vol. 34. No. 12A. Pp. 6468–6472.

REFERENCES

1. Borisova M. E., Koykov S. N., Fizika dielektrikov [Physics of dielectrics], Leningrad University Publishing, Leningrad, 1979 (in Russian).
2. Dissado L. A., Fothergill J. C., Electrical degradation and breakdown in polymers (IEE Materials and Devices Ser. 9), Peter Peregrinus Ltd., London, UK, 1992.
3. Ushakov V. Y., Insulation of high-voltage equipment, Springer, Berlin–Heidelberg, 2004.
4. Zakrevskii V. A., Pakhotin V. A., Sudar' N. T., Dielectric aging and dielectric degradation (breakdown) of polymer films in AC electric fields, Phys. Solid State. 61 (10) (2019) 1915–1921.
5. Semenov S. E., Kapralova V. M., Pakhotin V. A., Sudar' N. T., A mechanism of pulse breakdown evolution in polymeric films, Phys. Solid State. 64 (8) (2022) 954–960.
6. Zhuravleva N. M., Kiesewetter D. V., Reznik A. S., et al., Electrophysical characteristics of paper-impregnated insulation by modifying the cellulose base with a biopolymer, St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology. 24 (1) (2018) 75–86 (in Russian).
7. Zhu M.-X., Song H.-G., Li J.-C., et al., Phase-field modeling of electric-thermal breakdown in polymers under alternating voltage, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 27 (4) (2020) 1128–1135.
8. Zakrevskii V. A., Sudar' N. T., Ionization mechanism of the electrical degradation (breakdown) of polymer dielectric films, Phys. Solid State. 55 (7) (2013) 1395–1400.
9. Zakrevskii V. A., Sudar' N. T., Electrical breakdown of thin polymer films, Phys. Solid State. 47 (5) (2005) 961–967.
10. Slutsker A. I., Polikarpov Yu. I., Gilyarov V. L., On elementary events in the electrical failure kinetics of polymers, Tech. Phys. 51 (12) (2006) 1591–1595.
11. Bhutta M. S., Yang L., Ma Z., et al., Simulation of thickness controlled DC breakdown of XLPE regulated by space charge & molecular chain movement, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 27 (4) (2020) 1143–1151.
12. Borisova M. E., Marchenko M. S., Electric strength of polyimide films, Russ. Electr. Engin. 5 (1998) 4–6 (in Russian).
13. Sudar' N. T., Vliyaniye temperatury na probivnuyu napryazhennost polimerov v postoyannom elektricheskom pole [Influence of temperature on breakdown strength polymers in the direct current], Trudy SPbGTU [Proceedings of St. Petersburg State Technical University]. 507 (2008) 275–279 (in Russian).
14. Semenov S. E., The temperature effect on impulse dielectric strength of polymer films, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 17 (2) (2024) 141–149 (in Russian).
15. Montanari G. C., Seri P., Dissado L. A., Aging mechanisms of polymeric materials under DC electrical stress: A new approach and similarities to mechanical aging, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 26 (2) (2019) 634–641.
16. Bian H., Yang L., Ma Z., et al., Improved physical model of electrical lifetime estimation for crosslinked polyethylene AC cable, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 27 (1) (2020) 132–139.
17. Hirose H., A method to estimate the lifetime of solid electrical insulation, IEEE Trans. Electr. Insul. EI-22 (6) (1987) 745–753.



18. **Zakrevskii V. A., Slutsker A. I.**, Possible mechanisms of degradation of macromolecules in mechanical and electrical fields, *Polym. Sci. U.S.S.R.* 26 (6) (1984) 1341–1348.
19. **Simoni L.**, A general phenomenological life model for insulating materials under combined stresses, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 6 (2) (1999) 250–258.
20. **Mazzanti G., Montanari G. C., Civenni F.**, Model of inception and growth of damage from microvoids in polyethylene-based materials for HVDC cables. 2. Parametric investigation and data fitting, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 14 (5) (2007) 1255–1263.
21. **Dissado L., Mazzanti G., Montanari G. C.**, The incorporation of space charge degradation in the life model for electrical insulating materials, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2 (6) (1995) 1147–1158.
22. **Mazzanti G., Montanari G. C., Civenni F.**, Model of inception and growth of damage from microvoids in polyethylene-based materials for HVDC cables. 1. Theoretical approach, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 14 (5) (2007) 1242–1254.
23. **Mazzanti G.**, Life and reliability models for high voltage DC extruded cables, *IEEE Electr. Insul. Mag.* 33 (4) (2017) 42–52.
24. **Gilmore R.**, Catastrophe theory for scientists and engineers, Dover Publications, New York, 1993.
25. **Blythe T., Bloor D.**, Electrical properties of polymers, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2005.
26. **Rudskoi A. I., Baurova N. I.**, Technological heredity during the production and operation of structural materials, *Russ. Metall.* 2019 (13) (2019) 1378–1383.
27. **Baurova N. I., Zorin V. A., Prikhodko V. M.**, Determination of the synergetic effect of the damage accumulation process in polymer materials using catastrophe theory, *Theor. Found. Chem. Eng.* 50 (1) (2016) 119–125.
28. **Lu T., Cheng S., Li T., et al.**, Electromechanical catastrophe, *Int. J. Appl. Mech.* 8 (7) (2016) 1640005.
29. **Thete A., Geelen D., Van der Molen S. J., Tromp R. M.**, Charge catastrophe and dielectric breakdown during exposure of organic thin films to low-energy electron radiation, *Phys. Rev. Lett.* 119 (26) (2017) 266803.
30. **Zakrevskii V. A., Sudar' N. T.**, The effect of space charge on the electrical breakdown of polymers, *Tech. Phys.* 41 (4) (1996) 352–356.
31. **Kuchinskiy G. S., Nazarov N. I.**, *Silovyye elektricheskiye kondensatory* [Electrical power capacitors], 2nd edition, Energoatomizdat, Moscow, 1992 (in Russian).
32. **Emel'yanov O. A.**, Efficiency features of metal-film capacitors in accelerated conditions, *Russ. Electr. Engin.* 4 (2002) 6–10 (in Russian).
33. **Bobrovskaya L. D.**, Evaluating allowable field densities in epoxy insulation, *Electr. Technol. U.S.S.R.* 7 (1981) 43–45 (in Russian).
34. **Skanavi G. I.**, *Fizika dielektrikov (oblast' sil'nykh polei)* [Physics of dielectrics: Strong fields domain], GIFML Publishing, Moscow, 1958 (in Russian).
35. **Tsurimoto T., Nagao M., Kosaki M.**, Effect of oxidation on localized heat generation and dielectric breakdown of low-density polyethylene film, *Jpn. J. Appl. Phys.* 34 (12A) (1995) 6468–6472.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КИСЕЛЕВИЧ Валентин Владимирович — старший преподаватель кафедры «Промышленная теплоэнергетика и экология» Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого, г. Гомель, Республика Беларусь.

246029, Республика Беларусь, г. Гомель, пр. Октября, 48

valentinkis@list.ru

ORCID: 0000-0003-0542-0939

THE AUTHOR

KISELEVICH Valentin V.

Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi

48 October Ave., Gomel, 246029, Republic of Belarus

valentinkis@list.ru

ORCID: 0000-0003-0542-0939

*Статья поступила в редакцию 26.10.2024. Одобрена после рецензирования 28.01.2025.
Принята 28.01.2025.*

Received 26.10.2024. Approved after reviewing 28.01.2025. Accepted 28.01.2025.