06

Электрическая прочность полиэтилентерефталатного и слюдосодержащего композиционного диэлектриков при больших механических нагрузках

© В.О. Белько, О.А. Емельянов, Н.А. Федотов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: vobelko@spbstu.ru

Поступило в Редакцию 29 июля 2026 г.
В окончательной редакции 27 августа 2026 г.
Принято к публикации 6 сентября 2026 г.

Приводятся сравнительные результаты экспериментальных исследований кратковременной электрической прочности полиэтилентерефталатных (до 550 MV/m) и композитной (до 73 MV/m) пленок в условиях значительных поперечных механических нагрузок (до 500 MPa). Предложена связанная электростатическая модель контактного взаимодействия, учитывающая комбинированное воздействие механических напряжений и электрического поля. Результаты моделирования удовлетворительно согласуются с данными экспериментов.

Ключевые слова: полимерные пленки, механическая нагрузка, кратковременная электрическая прочность, композиционная полимерная изоляция, численное моделирование.

DOI: 10.61011/PJTF.2027.01.64122.20859

Для разработки систем высокомодульной изоляции электрофизических установок, подверженных комбинированному воздействию механических напряжений и электрического поля, необходимо целенаправленное исследование прочностных характеристик электроизоляционных материалов. Среди перспективных диэлектрических материалов имеет смысл рассматривать полимеры и композиты на их основе. По вопросам долговечности и импульсной механической прочности диэлектриков в настоящее время имеется обширный объем статей и даже ряд монографий [1,2]. Вопросам же электрического разрушения и пробоя в полимерах посвящен ряд публикаций, где изложена теория, основанная на представлениях о полевой ионизации макромолекул (см., например, работу [3] и цитируемую в ней литературу). В ряде перспективных электрофизических устройств, работающих в режимах одиночных или редко повторяющихся импульсов, механические напряжения и электрическое поле имеют поперечный характер действия по отношению к поверхности пленочных диэлектриков. При этом литературные данные о свойствах диэлектриков в условиях поперечного комбинированного воздействия двух указанных факторов крайне ограничены.

В ранней работе [4] для полиэтилена (ПЭ) под действием растягивающего напряжения прочность на пробой при переменном, постоянном и импульсном напряжениях уменьшалась с увеличением степени растяжения до 30 % с последующим ростом до тех пор, пока относительное растяжение не достигало величины ~ 160 %. В [5] представлены результаты проведенных при комнатной температуре измерений влияния механических сжимающих и растягивающих напряжений на электрическую прочность полиэтилентерефталата (ПЭТФ) и композита эпоксидной стеклоткани (FRP, G-10), которые широко используются для изоляции сверхпроводящих катушек магнитов. Для ПЭТФ электрическая прочность увеличивается с увеличением сжимающего напряжения в области упругой деформации. В случае FRP поведение характеристик пробоя при сжимающем напряжении почти такое же, как у ПЭТФ. Измерения прочности диэлектрика на пробой при постоянном напряжении проводились на ПЭТФ-пленках толщиной $50\,\mu$m при температурах 35, 70 и 100 °C и гидростатическом давлении от 5 до 50 MPa. Было обнаружено, что электрическая прочность E_{bd} увеличивается с давлением и уменьшается с температурой [6]. В работе [7] в качестве объектов исследования взяты ПЭ- и ПЭТФ-пленки толщиной в несколько десятков микрометров. Показано, что разрыв образца под действием приложенной механической нагрузки и пробой образца под действием электрического поля являются завершающими актами развивающихся в нагруженных объектах процессов, подготавливающих наступление макроскопической потери сплошности. В работе [8] исследовано снижение электрической долговечности — времени ожидания пробоя в постоянном по знаку электрическом поле — при растягивающем нагружении неориентированных пленок политетрафторэтилена (ПТФЭ) и ПЭТФ в области 100–300 K. Установлено, что растягивающее нагружение вызывает уменьшение глубины межмолекулярных ловушек электронов вследствие раздвижения соседних цепных молекул в аморфных областях полимеров. Это хорошо согласуется с представлением о накоплении со временем разрывов цепных молекул [9]. Испытания образцов этиленпропиленового каучука на пробой переменным током проводились при различных температурах и сжимающем напряжении [10]. При одинаковой температуре прочность на разрыв этиленпропиленового

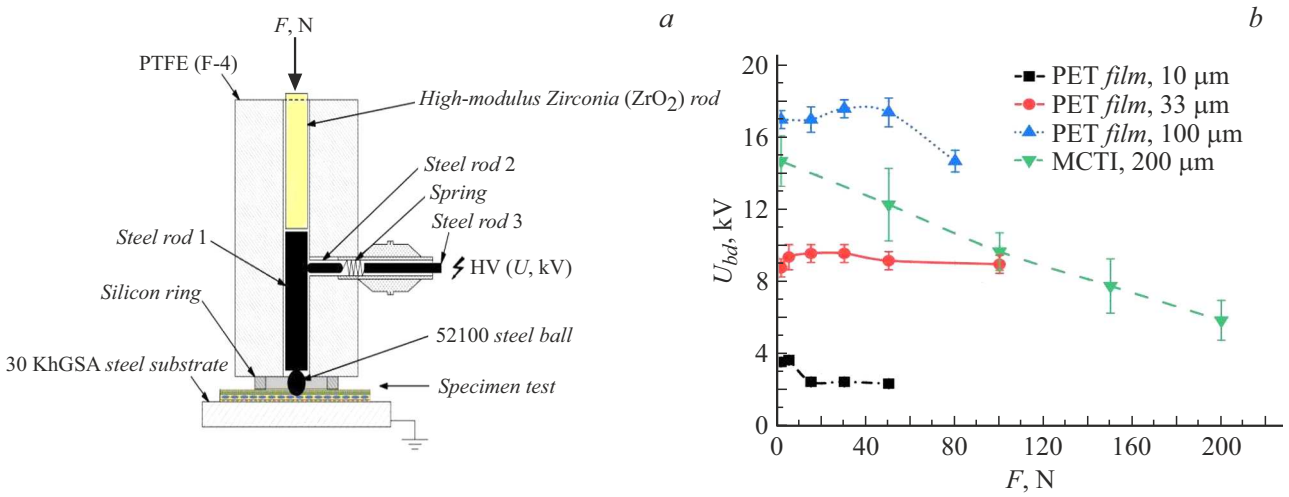


Рис. 1. Испытательная ячейка для определения электрической прочности при воздействии механической нагрузки (*a*) и экспериментальная зависимость пробивного напряжения полимерных и композиционного диэлектриков от приложенного механического усилия (*b*).

каучука сначала увеличивается с ростом сжимающего напряжения, постепенно достигает максимума и наконец демонстрирует тенденцию к снижению. Воздействие механических нагрузок приводит не только к вариации пробивных характеристик диэлектрика, но и к изменению их электрофизических свойств. Так, в [11] наблюдалось снижение относительной диэлектрической проницаемости эпоксидной смолы при переходе механического напряжения от сжатия к растяжению. Между степенью кристалличности полимерных диэлектриков и их электрической прочностью существует взаимосвязь: электрическая прочность возрастает при увеличении степени кристалличности [12]. Так, для пленок ПЭТФ толщиной 140–180 μm с низкой степенью кристалличности ($\sim 3\,\%$) характерны пониженные значения электрической прочности (около 150 MV/m) по сравнению с таковой для пленок, имеющих степень кристалличности 52 % (до 480 MV/m) [13]. Значительные нагрузки могут привести к изменению надмолекулярной структуры полимеров, так что для ПЭ и полипропилена (ПП) мелкосферолитная структура увеличивает плотность и электрическую прочность полимера [14]. Так, в [15] наблюдалось снижение электрической прочности ПП-пленок с ростом давления, а в [16] — с ростом их растяжения. Немонотонное поведение электрической прочности ПП-пленок по мере роста механической нагрузки отмечалось в [17]. В целом литературные данные о прочностных свойствах диэлектрических материалов в условиях комбинированного воздействия механических напряжений и электрического поля крайне немногочисленны и противоречивы, поэтому необходимо дальнейшее проведение исследований в указанном направлении. Целью работы является экспериментальное исследование кратковременной электрической прочности ПЭТФ- и композитной диэлектрических пленок в условиях значительных поперечных механических нагрузок, а также разработка связанной электростатической модели, учитывающей поле механических напряжений и позволяющей рассчитать напряженно-деформированное состояние в зоне контакта и оценить локальное перераспределение напряженности электрического поля с учетом механического деформирования материала.

Для определения электрической прочности при механическом нагружении были разработаны методика и испытательный стенд комбинированного воздействия нагрузок. В качестве образцов для испытаний использовались полимерные двуосноориентированные пленки ПЭТФ толщиной 10, 33 и 100 μm (степень кристалличности 40–45 %) и слюдосодержащая термореактивная изоляция (Mica-Containing Thermosetting Insulation, MCTI) толщиной 200 μm. Образцы MCTI, состоящие из двух слоев полотна слюдосодержащей изоляции, изготовленной по технологии Resin Rich, получались прессованием пластин при температуре 160 °C и давлении 1 MPa. Размер полимерных пленок и пластинок MCTI 80 × 80 mm.

Для отработки методики механического нагружения было испытано более 200 образцов, а для определения пробивного напряжения количество испытаний на группу составляло не менее 15. Электрическая прочность материалов в условиях комбинированного воздействия определялась с помощью специализированной измерительной ячейки, конструкция которой представлена на рис. 1, *a*. Конструкция включает корпус из ПТФЭ, систему токоподводящих электродов (*Steel rods* 1, 2, 3) для подачи высокого напряжения на рабочий электрод — стальной шаровой индентор (*Steel ball*, диаметр 2 или 5 mm), находящийся в контакте с поверхностью испытываемого материала (*Specimen test*). Верхний шток из ZrO_2 (модуль Юнга порядка 200 GPa, проч-

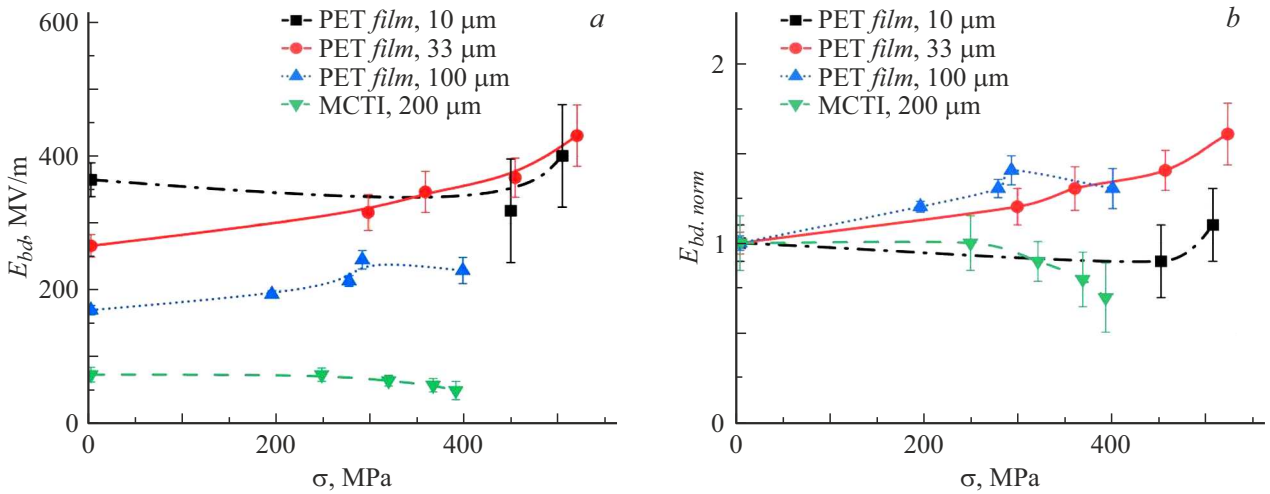


Рис. 2. Экспериментальная зависимость значения электрической прочности от механического давления для полимерных и композиционного диэлектриков (a) и их нормированные значения относительно ненагруженного состояния (b).

ность на сжатие 2500 MPa) передает контролируемое механическое давление на поверхность образца при одновременном обеспечении электрической изоляции от силовой части установки. Стальной шар внедрялся в поверхность образца (усилия от 0 до 300 N), после разгрузки проводилась оценка отпечатков, по которым можно определить глубину проникновения шара и величину механического давления. Обработка полученных отпечатков осуществляется на оптическом микроскопе. Механическое давление определяется как $\sigma = F/\pi Dt$, где F — приложенное усилие, D — диаметр шара, t — глубина проникновения индентора в образец, πDt — площадь шарового сегмента, к которой прикладывается усилие. После предварительного определения состояния диэлектрика при определенных уровнях механической нагрузки проведены испытания на пробой путем подачи равномерно повышающегося переменного напряжения частотой 50 Hz со скоростью 500 V/s. Результатом данных испытаний является зависимость изменения пробивного напряжения U_{bd} от механического усилия F, которое создавалось с помощью ручного испытательного стенда с цифровым датчиком силы ZMF-500 (диапазон измерения 0.01–500 N) (рис. 1, b). Электрическая прочность определялась как $E_{bd} = U_{bd}/b$, где $b = t_0 - t$ — остаточная толщина диэлектрика, t_0 — исходная толщина материала. Все электрические и механические испытания проводились при комнатной температуре ($T = 20 \pm 2\,^{\circ}$C) и относительной влажности воздуха $45 \pm 5\,\%$.

Статистический анализ полученных данных выполнен с учетом доверительных интервалов для средних значений каждой группы испытаний по формуле $\overline{x} \pm t_{0.95}\frac{S}{\sqrt{n}}$, где $t_{0.95}$ — коэффициент Стьюдента для $(n-1)$ и доверительной вероятности 95 %. Пробивное напряжение ПЭТФ толщиной 10 μm при воздействии минимальной нагрузки показывает тенденцию к снижению: $U_{bd} = 3.65-2.5$ kV при достижении усилия 15 N, после чего не имеет значительных изменений. Напряжение пробоя ПЭТФ толщиной 33 μm на протяжении всего процесса нагружения не показывает какой-либо статистически значимой зависимости ($U_{bd} = 8.8-9.8$ kV). Напряжение пробоя ПЭТФ толщиной 100 μm не имеет выраженных отличий до достижения нагрузки 80 N, при которой происходит снижение пробивного напряжения ($U_{bd} = 17-14.7$ kV). Иной характер изменений U_{bd} при воздействии механической нагрузки получен для MCTI. При увеличении нагрузки происходит снижение пробивного напряжения практически в 3 раза: $U_{bd} = 14.7-5.9$ kV. На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости $E_{bd}(\sigma)$ (a) и их нормированные значения (b). При увеличении механического давления электрическая прочность ПЭТФ толщиной 10 μm ($E_{bd} = 365$ MV/m для ненагруженного состояния) имеет участок снижения при достижении 450 MPa, на котором снижается на 10 %, после чего при давлении 450–500 MPa начинается участок резкого увеличения значения электрической прочности (на 20 % относительно исходного значения).

Электрическая прочность ПЭТФ толщиной 33 μm ($E_{bd} = 266$ MV/m для ненагруженного состояния) увеличивается на ~ 60 % относительно ненагруженного состояния при увеличении давления до значения 500 MPa. Результаты определения электрической прочности ПЭТФ толщиной 100 μm ($E_{bd} = 170$ MV/m для ненагруженного состояния) показывают схожую с более тонкими пленками тенденцию. При достижении механического давления 270 MPa происходит увеличение электрической прочности на 40 %, далее на участке механического давления от 270 до 350 MPa зафиксировано снижение электрической прочности относительно возросшего значения. Противоположное поведение под действием механической нагрузки демонстрирует

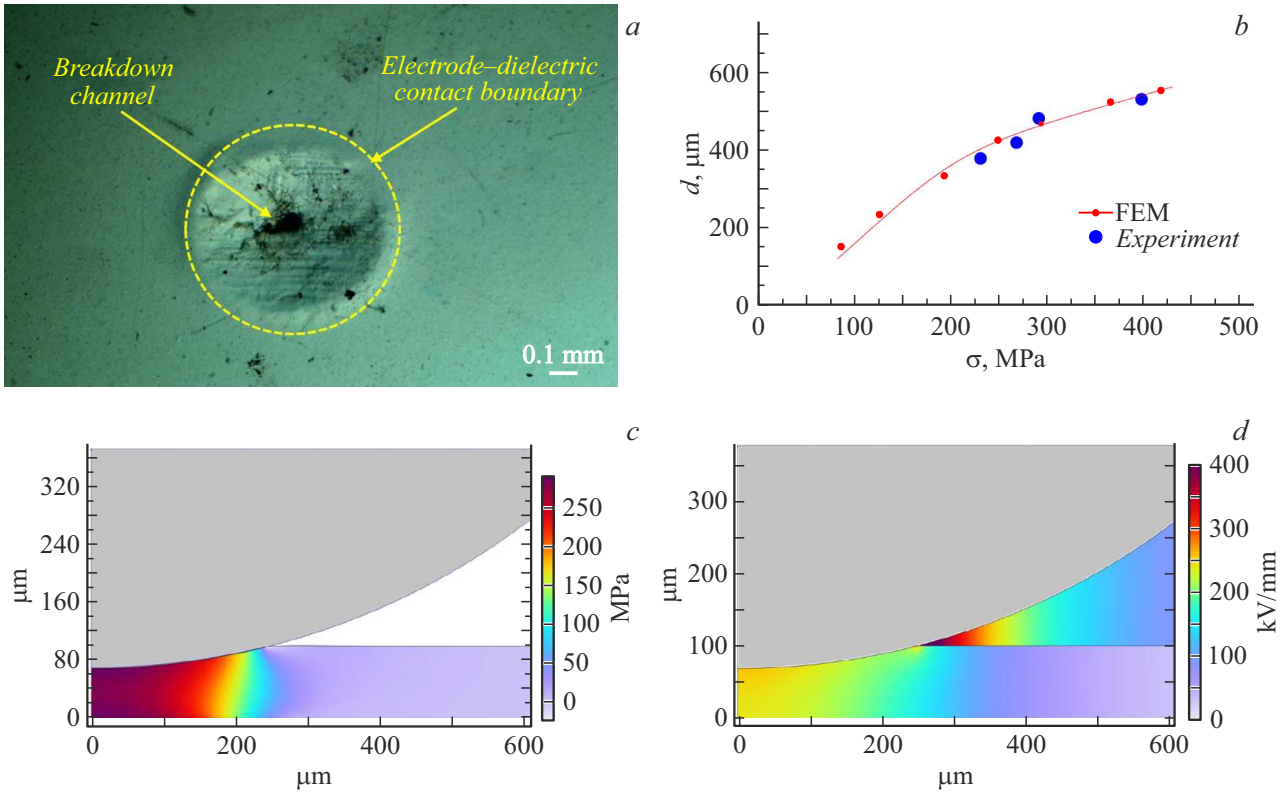


Рис. 3. Результаты, полученные с помощью метода конечных элементов (FEM), и сравнение с экспериментальными данными: снимок места пробоя и отпечатка на ПЭТФ толщиной $100\,\mu$m при усилии 80 N (a), сравнение экспериментальных и расчетных значений диаметра отпечатка при внедрении индентора в ПЭТФ толщиной $100\,\mu$m (b), распределение механического давления (c) и картина напряженности электрического поля (d) в зоне контакта.

МСТІ ($E_{bd} = 73.5$ MV/m для ненагруженного состояния): на всем участке механического давления происходит снижение электрической прочности на 30 %.

При анализе механизмов изменения прочности необходимо учитывать, что, согласно кинетической концепции разрушения твердых тел [1], механическое нагружение инициирует процессы накопления микродефектов и разрыва цепных молекул. Однако в условиях поперечного локального сжатия под сферическим индентором в термопласте ПЭТФ преобладают процессы ориентационной вытяжки макромолекул и уменьшения свободного объема в центральной зоне контакта. Это сдерживает рост микротрещин и приводит к ориентационному упрочнению, что компенсирует падение пробивного напряжения и приводит к росту истинной электрической прочности E_{bd}. В композите МСТІ, напротив, хрупкая и неоднородная эпоксидно-слюдяная матрица под действием сжатия испытывает растрескивание с образованием межфазных микротрещин, способствующих развитию электрического разряда, что вызывает падение как U_{bd}, так и E_{bd}.

Для интерпретации экспериментальных данных и выявления физических механизмов, определяющих изменение электрической прочности при механическом нагружении, была разработана связанная конечно-элементная модель в среде COMSOL Multiphysics 6.2.

Задача решалась в осесимметричной постановке (2D Axisymmetric). Геометрия включала стальной сферический индентор радиусом $R = 1$ mm, моделируемый как абсолютно жесткое тело, и деформируемую полимерную пленку ПЭТФ толщиной $33-100\,\mu$m, закрепленную по нижней грани и внешнему радиальному краю (условие жесткого защемления). Механическое поведение пленки описывалось упругопластической моделью с изотропным упрочнением. Упругие характеристики ($E_s = 1.9$ GPa, $\nu = 0.34$) и пластическая ветвь деформирования определялись из экспериментальной кривой, полученной нами при одноосном растяжении исследуемых материалов. Анализ распределения эквивалентных напряжений по Мизесу (рис. 3, c) выявил формирование под индентором локальной зоны пластической деформации, которая при усилиях свыше 30–40 N распространяется на всю остаточную толщину пленки. Анализ распределения напряженности поля $|E|$ в окрестности контакта (рис. 3, d) позволил выделить две характерные области, где поле достигает максимальных значений. В области на оси симметрии (под индентором, в толще диэлектрика) напряженность поля определяется в первую очередь уменьшением расстояния между элек-

тродами. С ростом нагрузки глубина внедрения увеличивается, остаточная толщина уменьшается, и нормальная компонента поля растет. Клиновидная область на периферии контакта, вблизи линии сопряжения трех сред (стальной индентор–полимерная пленка–атмосфера), представляет собой классический случай тройной точки. Детальный анализ компонент поля в этой области показал, что максимальная напряженность соответствует поверхностному (тангенциальному) вектору, направленному вдоль границы раздела полимер–воздух. Нормальная же компонента поля, направленная в толщу изоляции, в этой области значительно ниже и не превышает значений, наблюдаемых на оси симметрии. Из анализа микрофотографий пробитых образцов (рис. 3, *a*) видно, что сквозной канал пробоя в ПЭТФ-пленках формируется непосредственно в центральной зоне контакта электрода с диэлектриком (в области минимальной остаточной толщины), а не на внешней границе электрод–полимер (отмечена на рисунке штриховой линией), что подтверждает выводы численного моделирования о распределении нормальной компоненты поля.

Поле в клиновидной области хотя и велико по модулю, но способно инициировать лишь поверхностные частичные разряды, а не сквозной пробой диэлектрика. Для их подавления в воздушном зазоре вокруг зоны контакта электрода с образцом применялось силиконовое кольцо (*Silicon ring* на рис. 1, *a*), а зона контакта заливалась тонким слоем электроизолирующего силиконового масла. Подъем переменного напряжения осуществлялся с высокой скоростью (500 V/s), что дополнительно снижало влияние предпробойных процессов на результаты измерений.

Результаты моделирования показали хорошее согласие с экспериментом: отклонение расчетных значений глубины внедрения и диаметра отпечатка от измеренных не превышало 10 % (рис. 3, *b*). Таким образом, разработанная связанная модель позволяет с высокой точностью рассчитывать профиль деформации диэлектрика и локальную напряженность электрического поля в зоне контакта. Это обеспечивает возможность инженерного прогнозирования пробивных напряжений пленочной изоляции при контактном механическом нагружении.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский, *Кинетическая природа прочности твердых тел* (Наука, М., 1974).

[2] Б. Цой, Э.М. Карташов, В.В. Шевелев, А.А. Валишин, *Разрушение тонких полимерных пленок и волокон* (Химия, М., 1997).

[3] V.A. Zakrevskii, V.A. Pakhotin, N.T. Sudar, J. Appl. Phys., **115** (23), 234101 (2014). DOI: 10.1063/1.4883365

[4] S. Mita, K. Yahagi, Jpn. J. Appl. Phys., **14**, 197 (1975). DOI: 10.1143/JJAP.14.197

[5] C.H. Park, T. Kaneko, M. Hara, M. Akazaki, IEEE Trans. Electr. Insul., **EI-17** (3), 234 (1982). DOI: 10.1109/TEI.1982.298461

[6] N. Zebouchi, R. Essolbi, D. Malec, H.T. Giam, B. Ai, M. Bendaoud, J. Appl. Phys., **76** (12), 8218 (1994). DOI: 10.1063/1.357885

[7] А.И. Слуцкер, Т.М. Велиев, И.К. Алиев, В.А. Алекперов, С.А. Абасов, ФТТ, **32** (8), 2339 (1990).

[8] А.И. Слуцкер, В.Л. Гиляров, Ю.И. Поликарпов, ЖТФ, **78** (11), 60 (2008). [A.I. Slutsker, V.L. Gilyarov, Yu.I. Polikarpov, Tech. Phys., **53** (11), 1447 (2008). DOI: 10.1134/S106378420811008X]

[9] А.И. Слуцкер, В.Л. Гиляров, Д.Д. Каров, Ю.И. Поликарпов, ФТТ, **53** (7), 1255 (2011). [A.I. Slutsker, V.L. Hilyarov, D.D. Karov, Yu.I. Polikarpov, Phys. Solid State, **53** (7), 1322 (2011). DOI: 10.1134/S1063783411070262]

[10] Y. Liu, R. Men, M. Tian, Y. Wang, K. Han, Z. Lei, C. Li, in *2020 IEEE Int. Conf. on high voltage engineering and application (ICHVE)* (IEEE, 2020), p. 1–4. DOI: 10.1109/ICHVE49031.2020.9279990

[11] W.J. Zhang, B.X. Du, H.C. Liang, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., **31** (4), 2255 (2024). DOI: 10.1109/TDEI.2024.3406496

[12] *Электрические свойства полимеров,* под ред. Б.И. Сажина (Химия, Л., 1970).

[13] J. Artbauer, J. Phys. D, **29** (2), 446 (1996). DOI: 10.1088/0022-3727/29/2/024

[14] S.N. Kolesov, IEEE Trans. Electr. Insul., **EI-15** (5), 382 (1980). DOI: 10.1109/TEI.1980.298330

[15] Y.F. Li, B.X. Du, H.L. Liu, M. Xiao, in *2025 IEEE 5th Int. Conf. on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE)* (IEEE, 2025), p. 1–4. DOI: 10.1109/ICEMPE66159.2025.11122686

[16] K. Wu, H. Sui, Q. Qi, Z. Yang, P. Zhao, Y. Qin, K. Yang, B. Ouyang, S. Li, J. Li, Nano Lett., **25** (45), 16270 (2025). DOI: 10.1021/acs.nanolett.5c04644

[17] J. Song, X. Chen, Z. Li, N. Chen, T. ur Rahman, A. Paramane, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., **33** (3), 1924 (2026). DOI: 10.1109/TDEI.2025.3613284