

Научная статья

УДК 53.043

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17211>

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ИМПУЛЬСНУЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК

С. Е. Семенов<sup>1,2</sup>✉

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН,  
Санкт-Петербург, Россия

✉ [moritohayama96@gmail.com](mailto:moritohayama96@gmail.com)

**Аннотация.** В работе исследовано влияние температуры на пробивную напряженность пленок полиэтилена, поликарбоната и полиэтилентерефталата толщиной 2,0 – 2,5 мкм в температурном диапазоне 293 – 363 К. Установлено, что при нагреве образцов пленок пробивная напряженность электрического поля уменьшается незначительно, но обнаруживает существенный разброс значений. Показано, что экспериментальные данные по импульсному пробую полимерных пленок можно описать на основе представления об ионизационном механизме пробоя полимеров, не связанном с развитием ударной ионизации их молекул.

**Ключевые слова:** полимерная пленка, импульсный пробой, пробивная напряженность, полиэтилен, поликарбонат, полиэтилентерефталат, температура

**Для цитирования:** 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. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17211>

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.17211>

## THE TEMPERATURE EFFECT ON IMPULSE DIELECTRIC STRENGTH OF POLYMER FILMS

S. E. Semenov<sup>1,2</sup>✉

<sup>1</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

✉ [moritohayama96@gmail.com](mailto:moritohayama96@gmail.com)

**Abstract.** In the paper, the experimental data on the temperature effect on the breakdown strength of polypropylene, polycarbonate and poly(ethylene terephthalate) films 2.0–2.5 μm thick have been obtained over a temperature range from 293 to 363 K. When the film samples were heated, the breakdown electric field strength was found to decrease slightly but to reveal a significant scatter of values. It was shown that the experimental results on the pulsed electrical breakdown of the polymer films could be described basing the notion of the ionization mechanism of the polymer breakdown, not related to the development of an impact ionization of the polymer molecules.

**Keywords:** impulse dielectric strength, temperature, polypropylene, polycarbonate, poly(ethylene terephthalate)

**For citation:** 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. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.17211>

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

## Введение

Устойчивый интерес к изучению электрической прочности полимерных диэлектрических материалов сохраняется на протяжении многих десятилетий, что обусловлено большой научной и практической значимостью этой характеристики при изучении явления пробоя. В подавляющем числе публикаций по данному вопросу представлены результаты исследований электрического пробоя при воздействии на полимеры постоянного и переменного напряжений. Данных о закономерностях импульсного пробоя полимеров существенно меньше и, в основном, это результаты исследований, выполненных несколько десятилетий назад [1 – 3]. Развитие технических средств регистрации импульсного пробоя в последние годы обеспечило возможность его фиксации с временным разрешением в единицы наносекунд, что позволило регистрировать момент пробоя и величину пробивного напряжения с высокой точностью [4 – 9].

Одним из важнейших факторов, влияющих на развитие процессов электрического разрушения и пробоя полимерных диэлектриков, выступает температура. Ее роль при воздействии импульсного напряжения изучалась на массивных образцах полиметилметакрилата (ПММА) [2], полиэтилена (ПЭ) и политетрафторэтилена (ПТФЭ) [3]. Характер влияния температуры на пробивную напряженность  $F_{br}$  разных полимеров оказывался различным. Если при нагреве образцов ПММА от 293 до 433 К величина  $F_{br}$  снижалась более чем на 25 %, то для ПЭ и ПТФЭ в этом же температурном интервале значение  $F_{br}$  оставалось практически неизменным.

Среди всего многообразия полимерных диэлектрических материалов особое место занимают полимерные пленки. С одной стороны, они широко применяются в электротехнике, например при производстве высоковольтных конденсаторов, а с другой – пленки толщиной от единиц до нескольких десятков микрометров служат удобными объектами для исследований электрического старения и пробоя собственно полимерного материала. Однако до сих пор воздействие температуры именно на импульсную электрическую прочность полимерных пленок не изучено детально.

Цель настоящей работы – определение характера влияния температуры на закономерности импульсной электрической прочности пленок различных полимеров при комнатной и повышенных температурах.

## Методика эксперимента

В качестве объектов исследования использовались пленки промышленного производства из полипропилена (ПП) толщиной 2,0 мкм, а также поликарбоната (ПК) и полиэтилентерефталата (ПЭТФ) толщиной 2,5 мкм. Полимеры, используемые для изготовления этих пленок, характеризуются различной степенью полярности, разными значениями температуры стеклования и размягчения, а также различной морфологией структуры материала.

Пленки закреплялись в специальной кольцевой оправке и устанавливались между стальными электродами, один из которых имел форму плоского диска (диаметр – 40 мм), а второй – сферы (диаметр – 6 мм). Поверхность электродов полировали до зеркального блеска. Пространство между сферическим электродом и пленкой заливалось конденсаторным маслом, что предотвращало краевые и поверхностные разряды. На исследуемые образцы пленок однократно подавался высоковольтный импульс отрицательной полярности, с амплитудой 2,5 кВ и длительностью переднего фронта около 130 нс.

Используемая электродная система обеспечивала в месте пробоя пленки электрическое поле, близкое к однородному. Если учитывать, что в подавляющем большинстве случаев пробой пленок происходил на переднем фронте импульса, то для оценки их импульсной



электрической прочности было целесообразно использовать величину пробивной напряженности  $F_{br}$ , определяя ее как

$$F_{br} = U_{br}/d,$$

где  $U_{br}$  – напряжение на образце в момент пробоя,  $d$  – толщина пленки.

Измерение  $U_{br}$  проводилось с помощью широкополосного запоминающего осциллографа ADS-2332 и высоковольтного широкополосного делителя с граничной частотой 300 МГц, что позволяло непосредственно фиксировать изменение напряжения на образце. Момент пробоя пленки на осциллограммах определялся по резкому падению напряжения и возникновению осцилляций. Типичная осциллограмма, регистрируемая в момент пробоя на фронте импульса, представлена на рис. 1.

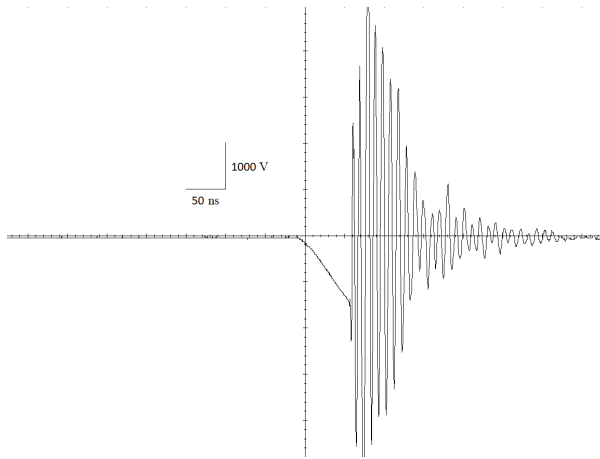


Рис. 1. Типичная осциллограмма сигнала в момент пробоя полимерной пленки толщиной 2,0 или 2,5 мкм на фронте импульса

Электрические испытания проводились в температурном диапазоне 293 – 363 К. Отметим, что выбранная нами верхняя граница температуры была ниже температуры размягчения любого из исследуемого полимеров, что исключало продавливание пленки шаровым электродом и, как следствие этого, снижение величины ее пробивного напряжения.

#### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Значения напряжения  $U_{br}$  полимерных диэлектрических материалов, в том числе и полимерных пленок, характеризуются существенным разбросом, поэтому испытания на пробой следует многократно повторять, а их результаты – статистически анализировать. При каждой температуре мы испытывали на пробой не менее 50 образцов каждой полимерной пленки и находили значения  $F_{br}$ , на основании которых рассчитывали эмпирическую функцию распределения  $f(F)$ , которая определяет вероятность пробоя полимерной пленки при достижении напряжения  $U$  (напряженности электростатического поля  $F$ ). Расчет значений функции  $f(F)$  выполняли по формуле

$$f(F) = n/N, \quad (1)$$

где  $N$  – число выполненных испытаний,  $N \geq 50$ ;  $n$  – число образцов, пробитых по достижении напряженности поля  $F$ .

В статьях [10 – 12] показано, что вейбулловская вероятностная модель отказов применима для статистического анализа результатов электрического пробоя как при постоянном, так и при импульсном электрических воздействиях на полимерные диэлектрики. Поэтому для аппроксимации эмпирической функции распределения, определяемой соотношением (1), применялось двухпараметрическое распределение Вейбулла, имеющее вид

$$f(F) = 1 - \exp[-(F/F_0)^m], \quad (2)$$

где  $m$  – параметр формы,  $F_0$  – параметр масштаба.

Параметры  $m$  и  $F_0$  легко оцениваются с помощью метода наименьших квадратов при линеаризации выражения (2).

На рис. 2 представлен типичный вид линеаризованных функций  $f(F)$  для исследованных на пробой полимерных пленок при разных температурах. Во всех случаях коэффициент корреляции аппроксимирующих прямых оказался выше 0,97, что указывает на обоснованность используемой нами линейной аппроксимации. Значения параметров  $m$  и  $F_0$  рассчитывались с помощью метода наименьших квадратов, а затем использовались для

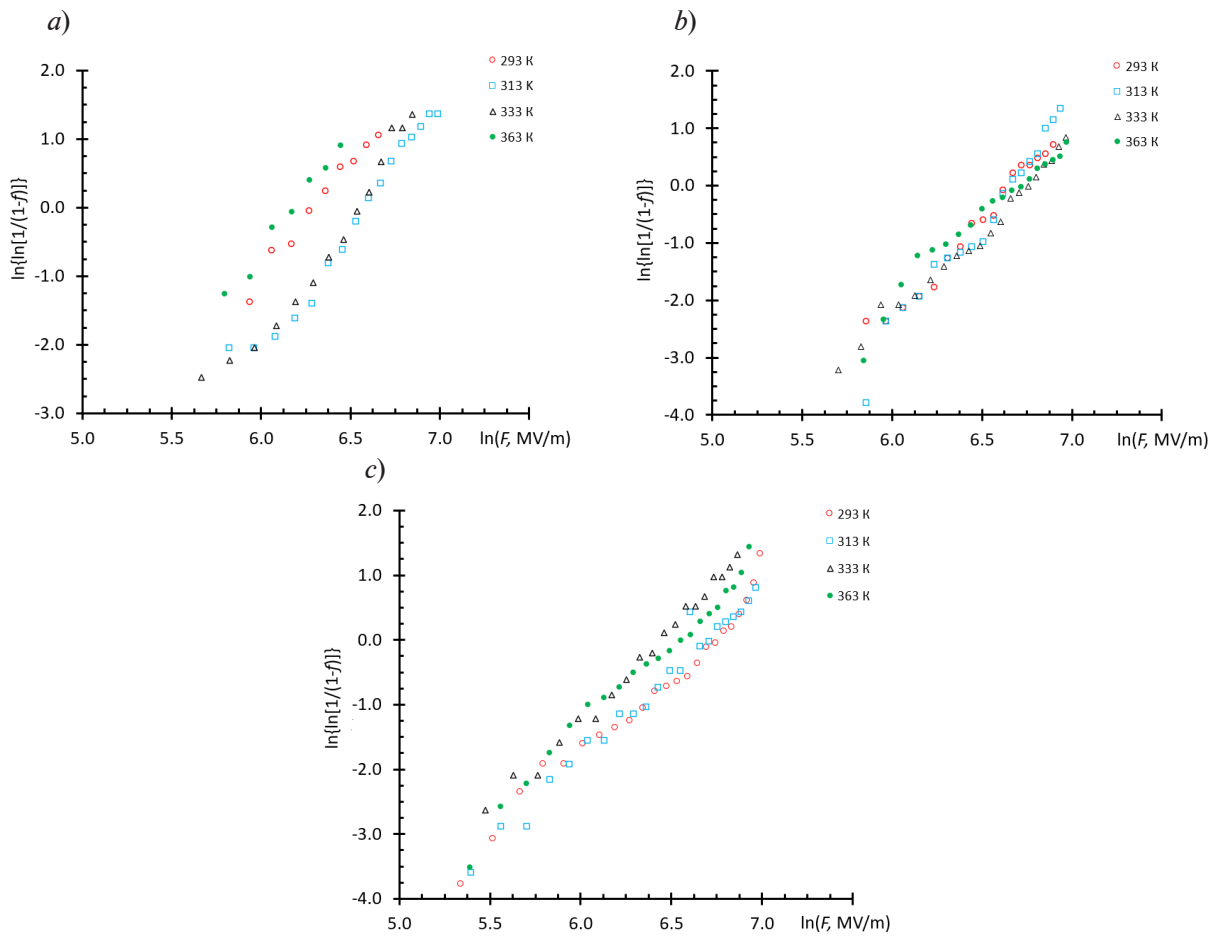


Рис. 2. Линеаризованные функции распределения Вейбулла для пленок ПП (a), ПЭТФ (b) и ПК (c) при различных температурах в диапазоне 293 – 363 К

вычисления первых четырех моментов  $\mu_k$  функции распределения [13]:

$$\mu_k = F_0^k \int_0^{\infty} x^{k/m} \exp(-x) dx. \quad (3)$$

Это математическое ожидание распределения Вейбулла  $F_{br}$  (при  $k = 1$ ), его дисперсия  $\sigma$  (при  $k = 2$ ), коэффициент асимметрии  $\mu_3$  (при  $k = 3$ ) и эксцесс  $\mu_4$  (при  $k = 4$ ).

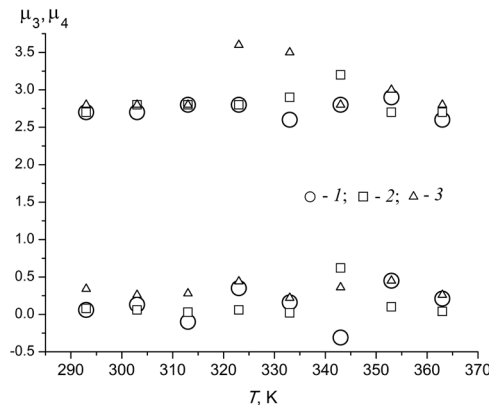


Рис. 3. Температурные зависимости коэффициента асимметрии ( $\mu_3$ , нижние символы) и эксцесса ( $\mu_4$ , верхние символы) функции распределения пробивной напряженности пленок ПЭТФ (символы 1), ПП (2) и ПК (3)

На рис. 3 представлены температурные зависимости коэффициента асимметрии и эксцесса функции  $f(F)$  исследованных полимерных пленок. Видно, что при всех значениях температуры  $\mu_3 \neq 0$ , а значения коэффициента асимметрии, вычисленные при разных температурах, близки; следовательно, функции  $f(F)$  нельзя считать симметричными. Однако значения коэффициента  $\mu_3$  невелики, причем преобладают плюсовые величины, что указывает на незначительную положительную асимметрию функции  $f(F)$ .

В исследованном температурном диапазоне эксцесс  $\mu_4$  этой функции изменяется от 2,5 до 3,5 и от температуры не зависит. Отметим здесь, что нормальное распределение должно иметь нулевую асимметрию и эксцесс, равный 3 [13]. Вычисленные нами значения

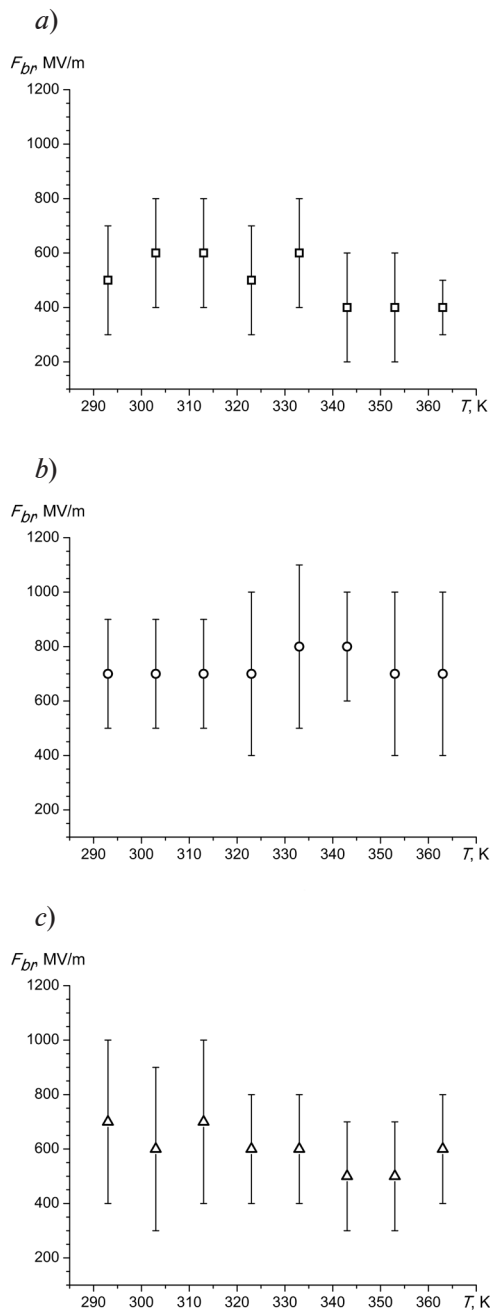


Рис. 4. Температурные зависимости наиболее вероятной пробивной напряженности электрического поля для пленок ПП (a), ПЭТФ (b) и ПК (c)

$\mu_3$  и  $\mu_4$  близки к этим величинам, однако полученные нами распределения пробивной напряженности все же нельзя считать нормальными.

Температурные зависимости наиболее вероятной пробивной напряженности и соответствующие значения дисперсии при каждой температуре представлены на рис. 4 для всех трех видов полимерных пленок. Значения величины  $F_{br}$  демонстрируют значительный разброс для всех исследованных полимеров в рассматриваемом температурном диапазоне и, как можно отметить, имеют тенденцию к снижению с ростом температуры (по крайней мере, для пленок ПП и ПК).

Для статистического обоснования гипотезы о снижении  $F_{br}$  при нагреве полимерных пленок и с учетом небольшого числа элементов выборки (оно определяется количеством температурных точек, при которых проводились испытания) был применен  $t$ -критерий Стьюдента. При этом выборка значений  $F_{br}$  для каждого полимера разбивалась на две равные (по числу температурных точек) группы: «низко-» и «высокотемпературную»; затем с помощью критерия Стьюдента (при доверительной вероятности 90 %), сравнивались соответствующие средние величины, рассчитанные для каждой из этих групп [14]. Полученные таким образом результаты дают основание утверждать, что рассматриваемую гипотезу о влиянии температуры на  $F_{br}$  с указанной степенью вероятности можно принять только для пленки ПК. Для пленок ПП и ПЭТФ влияние температуры на  $F_{br}$  нельзя считать значимым.

Следует отметить, что в процессе нагрева ни пленка ПП, ни пленка ПК не изменяли своего фазового состояния, поскольку в первом случае область стеклования составляет 253 – 263 К [15] и при температуре выше комнатной ПП находился в эластичном состоянии; напротив, во втором случае температура стеклования  $T_g \approx 415$  К и ПК находился в стеклообразном состоянии

даже при самой высокой (используемой в данной работе) температуре – равной 363 К. Что же касается пленки ПЭТФ, у нее температура стеклования  $T_g \approx 343$  К, т. е. значение  $T_g$  лежит в исследованном нами температурном диапазоне, однако<sup>g</sup> при прохождении этой точки не наблюдалось какого-либо заметного изменения  $F_{br}$ .

Вместе с тем известно, что при электрических испытаниях полимеров в постоянном электрическом поле, в области температуры стеклования происходит резкое уменьшение их пробивной напряженности [16, 17]. Таким образом, можно полагать, что размораживание молекулярной подвижности в полимерах не оказывает заметного влияния на импульсную электрическую прочность полимерных диэлектрических пленок, что связано, по-видимому, с кратковременным воздействием электрического поля на полимер. Действительно, при пробое пленки на переднем фронте импульса этот временной интервал не превышает 100 нс.

Установлено, что временной промежуток развития завершающей стадии электрического пробоя полимерных пленок, на которой происходит разрушение материала диэлектрика и образование канала пробоя, составляет порядок примерно  $10^{-9} - 10^{-8}$  с; при этом амплитуда плотности тока пробоя достигает значений около  $10^7$  А/см<sup>2</sup> [17, 18].

Отметим, что осцилляции напряжения на образце, всегда регистрируемые на осциллограммах после пробоя, могут продолжаться в течение нескольких сотен наносекунд (см. рис. 1), но их возникновение обусловлено откликом измерительной схемы на кратковременный импульс тока пробоя [18]. Очевидно, что выяснение причины столь стремительного роста тока при пробое остается одной из важнейших задач, решение которой позволит получить более полное представление о закономерностях импульсного электрического пробоя полимерных диэлектрических пленок, поскольку до сих пор отсутствует единая точка зрения на это явление.

В настоящее время обсуждаются два возможных физических механизма, определяющих развитие электрического пробоя в полимерах, а именно – ударная ионизация, приводящая к образованию электронной лавины [4, 9, 19, 20] и полевая (туннельная) ионизация макромолекул [6 – 8]. Отметим, что за последние годы все чаще стали появляться работы, содержащие критику гипотезы ударной ионизации в полимерах (см., например, статьи [6 – 8]). Суть критических замечаний состоит в том, что в полимерных диэлектриках длина свободного пробега электронов не превышает 1 – 3 нм и в реально достижимом электрическом поле электроны не способны набирать энергию 6 – 7 эВ, необходимую для ионизации полимерных макромолекул.

Вместе с тем известно, что вероятность появления в полимерах нанопор больших размеров возрастает с повышением температуры [21]. По мнению автора работы [22], именно в таких порах и будет происходить ударная ионизация. Теория, основанная на данных представлениях [22], приводит к резкой зависимости пробивной напряженности электрического поля от температуры, которая особенно явно будет выражена при значениях температуры выше точки стеклования полимера. Однако, как было сказано выше, величина  $F_{br}$  при импульсном электрическом пробое полимерных пленок практически не зависит от температуры.

Возможность использования представлений о полевой (туннельной) ионизации макромолекул для объяснения закономерностей импульсного пробоя полимеров была продемонстрирована в работах [6 – 8]. Согласно этой теории, в результате полевой ионизации макромолекул возникают электроны и положительно заряженные молекулярные ионы (дырки). Взрывообразное возрастание их концентрации обусловлено эффектом дебаевского экранирования, проявляющимся при достижении некоторой критической концентрации зарядов. Дебаевское экранирование приводит к уменьшению энергии ионизации макромолекул и, как следствие этого, самоускорению процесса полевой ионизации. В развитие этой теории авторы работы [8] предположили, что при импульсном электрическом воздействии на полимерную пленку полевая ионизация макромолекул будет ускоряться на переднем фронте импульса. Этот эффект обусловлен тем, что инжектированные из катода электроны способны приобрести в электрическом поле энергию, достаточную для возбуждения молекул, но не достаточную для их ионизации. Возбужденные полимерные молекулы будут ионизоваться при меньших значениях напряженности электрического поля, чем молекулы, находящиеся в основном состоянии. Поэтому критическая



концентрация электронов и дырок достигается за меньшее время, что и является причиной пробоя на фронте импульса. Незначительное уменьшение пробивной напряженности полимерных пленок при их нагреве, согласно объяснению, приведенному в статье [8], связано с возрастанием концентрации свободных электронов как за счет увеличения плотности инжекционного тока, так и вследствие возрастания вероятности термоактивационного выброса электронов из ловушек.

### Заключение

Выполнено экспериментальное исследование влияния температуры на пробивную напряженность тонких полимерных диэлектрических пленок полипропилена, поликарбоната и полиэтилентерефталата в температурном диапазоне от 293 до 363 К. Показано, что при статистической обработке результатов экспериментов может быть использовано двухпараметрическое распределение Вейбулла. Параметры этого распределения, определенные при каждой температуре для каждой пленки, позволяют рассчитать наиболее вероятную пробивную напряженность  $F_{br}$  и дисперсию распределения  $\sigma$ . Установлено, что значение  $F_{br}$  при нагреве полимеров в указанном диапазоне уменьшается незначительно, но характеризуется существенной дисперсией, не зависящей от температуры.

Показано, что представленные экспериментальные данные о влиянии температуры на импульсную электрическую прочность полимеров можно объяснить на основе представления об ионизационном механизме пробоя полимеров, не связанном с развитием в них ударной ионизации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Selle F., Schulte D. Electrical breakdown of EPR-insulated cables at DC and impulse voltages // IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1987. Vol. 22. No. 2. Pp. 139–143.
2. Watson D. B. Time lags in the impulse voltage breakdown of PMMA at high temperatures // Journal of Physics D: Applied Physics. 1996. Vol. 29. No. 12. Pp. 3129–3131.
3. Кривко В. В., Лехт Ю. И. Влияние температуры на импульсное пробивное напряжение некоторых твердых полимерных диэлектриков // Известия Томского политехнического института. 1970. Т. 157. С. 201–205.
4. Chen Z., Ji S., Jia W., Tang J., Guo F., Li J., Chen W. Experimental study of the breakdown characteristics of polypropylene films under nanosecond voltage pulses // IEEE Transactions on Plasma Science. 2018. Vol. 46. No. 11. Pp. 4010–4016.
5. Адамьян Ю. Э., Кривошеев С. И., Магазинов С. Г. Особенности описания импульсной электрической прочности полимерных диэлектриков // Письма в Журнал технической физики. 2021. Т. 47. № 5. С. 48–50.
6. Закревский В. А., Пахотин В. А., Сударь Н. Т. Импульсная электрическая прочность пленки полипропилена // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. № 2. С. 249–253.
7. Закревский В. А., Пахотин В. А., Сударь Н. Т. Влияние крутизны фронта импульса напряжения на электрическую прочность полимеров // Журнал технической физики. 2019. Т. 89. № 1. С. 120–125.
8. 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.
9. Zhao L., Su J. C., Liu C. L. Review of developments on polymers' breakdown characteristics and mechanisms on a nanosecond time scale // AIP (American Institute of Physics) Advances. 2020. Vol. 10. No. 3. P. 035206.
10. Dissado L. A. Theoretical basis for the statistics of dielectric breakdown // Journal of Physics D: Applied Physics. 1990. Vol. 23. No. 12. Pp. 1582–1591.
11. Wilson M. P., Given M. J., Timoshkin I. V. Impulse-driven surface breakdown data: A Weibull statistical analysis // IEEE Transactions on Plasma Science. 2012. Vol. 40. No. 10. Pp. 2449–2455.
12. Zhao L., Su J. C., Zhang X. B., Pan Y. F., Wang L. M., Sun X., Li R. Research on reliability and lifetime of solid insulation structures in pulsed power systems // IEEE Transactions on Plasma Science. 2012. Vol. 41. No. 1. Pp. 165–172.
13. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем. Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 604 с.

14. Берестнева О. Г., Марухина О. В., Шевелев Г. Е. Прикладная математическая статистика. Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2012. 188 с.
15. Пропилена полимеры // Энциклопедия полимеров. В 3 тт. Гл. ред. В. А. Кабанов. Т. 3. Полиоксадиазолы – Я. М.: Советская энциклопедия, 1977. 1152 стб. С. 208–214.
16. Сажин Б. И., Лобанов А. М., Романовская О. С. Электрические свойства полимеров. Под ред. Б. И. Сажина. 3-е изд. Ленинград: Химия, 1986. 224 с.
17. Пахотин В. А., Закревский В. А., Сударь Н. Т. Об измерении тока электрического пробоя диэлектриков // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 8. С. 40–45.
18. Пахотин В. А., Сударь Н. Т. Методика измерения сопротивления канала электрического пробоя тонких диэлектрических пленок // Приборы и техника эксперимента. 2019. № 3. С. 30–37.
19. Zhao L. A formula to calculate solid dielectric breakdown strength based on a model of electron impact ionization and multiplication // AIP (American Institute of Physics) Advances. 2020. Vol. 10. No. 2. P. 025003.
20. Zhao L. Theoretical calculation on formative time lag in polymer breakdown on a nanosecond time scale // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2020. Vol. 27. No. 4. Pp. 1051–1058.
21. Тютнев А. П., Садовничий Д. Н., Саенко В. С., Пожидаев Е. Д. Молекулярные движения и их роль в переносе избыточных зарядов в полимерах // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2000. Т. 42. № 1. С. 16–26.
22. Artbauer J. Electric strength of polymers // Journal of Physics D: Applied Physics. 1996. Vol. 29. No. 2. Pp. 446–456.

#### REFERENCES

1. Selle F., Schulte D., Electrical breakdown of EPR-insulated cables at DC and impulse voltages, IEEE Trans. Electr. Insul. 22 (2) (1987) 139–143.
2. Watson D. B., Time lags in the impulse voltage breakdown of PMMA at high temperatures, J. Phys. D: Appl. Phys. 29 (12) (1996) 3129–3131.
3. Krivko V. V., Lekht Yu. I., Vliyaniye temperatury na impulsnoye probivnoye napryazheniye nekotorykh tverdykh polimernykh dielektrikov [The temperature influence on the impulse voltage breakdown of some solid polymeric dielectrics], Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute. 157 (1970) 201–205 (in Russian).
4. Chen Z., Ji S., Jia W., et al., Experimental study of the breakdown characteristics of polypropylene films under nanosecond voltage pulses, IEEE Trans. Plasma Sci. 46 (11) (2018) 4010–4016.
5. Adam'yan Y. E., Krivosheev S. I., Magazinov S. G., Describing the impulse insulation strength of polymer dielectrics, Techn. Phys. Lett. 47 (3) (2021) 211–213.
6. Zakrevski V. A., Pakhotin V. A., Sudar' N. T., Pulsed electric strength of polypropylene film, Techn. Phys. 62 (2) (2017) 276–281.
7. Zakrevski V. A., Pakhotin V. A., Sudar' N. T., Effect of the voltage pulse front steepness on the electric strength of polymers, Techn. Phys. 63 (12) (2018) 1814–1819.
8. Semenov S. E., Kapralova V. M., Pakhotin V. A., Sudar N. T., A mechanism of pulse breakdown evolution in polymeric films, Physics of the Solid State. 64 (8) (2022) 954–960.
9. Zhao L., Su J. C., Liu C. L., Review of developments on polymers' breakdown characteristics and mechanisms on a nanosecond time scale, AIP Adv. 10 (3) (2020) 035206.
10. Dissado L. A., Theoretical basis for the statistics of dielectric breakdown, J. Phys. D: Appl. Phys. 23 (12) (1990) 1582–1591.
11. Wilson M. P., Given M. J., Timoshkin I. V., Impulse-driven surface breakdown data: A Weibull statistical analysis, IEEE Trans. Plasma Sci. 40 (10) (2012) 2449–2455.
12. Zhao L., Su J. C., Zhang X. B., et al., Research on reliability and lifetime of solid insulation structures in pulsed power systems, IEEE Trans. Plasma Sci. 41 (1) (2012) 165–172.
13. Kapur K. C., Lamberson L. R., Reliability in engineering design, Wiley, Hoboken, New Jersey, US, 1991.
14. Berestneva O. G., Marukhina O. V., Shevelev G. E., Prikladnaya matematicheskaya statistika [Applied mathematical statistics], Tomsk Polytechnic Institute Publishing, Tomsk, 2012 (in Russian).





15. Propilena polimery; Entsiklopediya polimerov. V 3 tt. Glav. red. V. A. Kabanov. T. 3. [Encyclopedia of polymers. In 3 Vols, Chief Editor V. A. Kabanov, Vol. 3. Soviet Encyclopedia Publishing, Moscow, 1152 Column (1977) 208–214 (in Russian).
16. **Sazhin B. I., Lobanov A. M., Romanovskaya O. S.**, Electrical properties of polymers, Third ed., Khimiya Publishing, Leningrad, 1986 (in Russian).
17. **Pakhotin V. A., Zakrevskii V. A., Sudar' N. T.**, Measurement of breakdown current in dielectric materials, Techn. Phys. 60 (8) (2015) 1144–1149.
18. **Pakhotin V. A., Sudar N. T.**, A technique for measuring the resistance of an electrical breakdown channel in thin dielectric films, Instruments and Experimental Techniques. 62 (3) (2019) 329–336.
19. **Zhao L.**, A formula to calculate solid dielectric breakdown strength based on a model of electron impact ionization and multiplication, AIP Adv. 10 (2) (2020) 025003.
20. **Zhao L.**, Theoretical calculation on formative time lag in polymer breakdown on a nanosecond time scale, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 27 (4) (2020) 1051–1058.
21. **Tyutnev A. P., Sadovnichii D. N., Sayenko V. S., Pozhidayev E. D.**, The effect of molecular motions on the transport of excess charge carriers in polymers, Polymer Sci. 42A (1) (2000) 16–26 (in Russian).
22. **Artbauer J.**, Electric strength of polymers, J. Phys. D: Appl. Phys. 29 (2) (1996) 446–456.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**СЕМЕНОВ Сергей Евгеньевич** – аспирант Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, младший научный сотрудник Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

moritohayama96@gmail.com

ORCID: 0009-0000-5779-9966

#### THE AUTHOR

**SEMENOV Sergey E.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*

*Ioffe Institute, RAS*

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia

moritohayama96@gmail.com

ORCID: 0009-0000-5779-9966

*Статья поступила в редакцию 12.01.2024. Одобрена после рецензирования 22.01.2024. Принята 01.02.2024.*

*Received 12.01.2024. Approved after reviewing 22.01.2024. Accepted 01.02.2024.*