

04.1

## Исследование условий пробоя газов в пористом диэлектрике

© Д.Д. Медведев<sup>1</sup>, Н.К. Белов<sup>2</sup>, О.О. Гранкина<sup>1</sup>, А.А. Книжник<sup>1</sup>, С.В. Коробцев<sup>1</sup>, Б.В. Потапкин<sup>1</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, Москва, Россия<sup>2</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

E-mail: dm\_medvedev@mail.ru

Поступило в Редакцию 10 июня 2021 г.

В окончательной редакции 12 июля 2021 г.

Принято к публикации 13 июля 2021 г.

Известно, что плазменная обработка пористых полимерных материалов является перспективным методом создания новых материалов, которые могут найти применение в различных прикладных задачах, в том числе в медицине, при разработке новых типов биосовместимых и биоразлагаемых полимерных материалов. Исследованы процессы плазменной обработки пористых полимерных материалов в зависимости от размера и типа пор для уточнения условий пробоя и оптимизации процесса обработки. Предложена удобная полумпирическая модель развития пробоя в пористом диэлектрике.

**Ключевые слова:** плазменная обработка диэлектрика, закон Пашена в пористой среде, напряжение пробоя пористого материала.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.20.51614.18914

Плазменная обработка полимерных материалов — известный инструмент для модификации свойств их поверхности (увеличение гидрофильности и адгезии красителей и клеящих материалов). Обработка не только поверхности, но и всего объема пористых полимерных материалов может дать гораздо больший эффект и использоваться для создания новых материалов, которые могут найти применение в различных прикладных задачах, в том числе при разработке новых типов биосовместимых и биоразлагаемых полимерных материалов.

Плазменная обработка пор в полимерных материалах предполагает зажигание плазмы внутри этих пор или, другими словами, электрический пробой газа между электродами, впервые описанный Пашеном [1]. Закон Пашена продолжает уточняться и модифицироваться [2–5] для практически важных условий, в частности для микрозазоров. Целью настоящей работы является исследование процесса пробоя в пористом диэлектрике, который можно рассматривать как пробой группы последовательных микрозазоров при достижении в каждом из них пашеновского пробойного напряжения.

Эксперименты проводились в разрядной камере с входом и выходом газа, состоящей из прозрачной верхней половины и заземленного металлического дна с уплотнительным кольцом из силиконовой резины. Роль высоковольтного прозрачного электрода со стеклянным барьером выполнял закрытый стеклянный сосуд с плоским дном диаметром 20 мм с водным раствором NaCl с проводимостью 20 мС/см. Обрабатываемый образец помещался в зазор толщиной 2.5 мм между высоковольтным и заземленным электродами.

Для исследования процесса пробоя в пористом материале, помещенном в разрядный зазор, снимались осциллограммы напряжения и тока, протекающего через систему электродов. Для сравнения также были полу-

чены осциллограммы при пустом зазоре. Эксперименты проводились на образцах пористого полиуретана с полностью связанными порами и пористого полистирола с не полностью связанными порами на воздухе при разном давлении ( $p$ ).

На рис. 1 приведен пример осциллограммы измеренного тока и напряжения для пустого зазора и образца пористого полиуретана со связанными порами со средним размером 0.17 мм. На рис. 1 также приведены рассчитанные значения емкостного тока — произведения производной напряжения по времени и емкости электродной системы и подводящих проводов (2.9 пФ). Емкостный ток позволяет вычислить ток разряда (разность измеренного и емкостного тока) для более точного определения момента и напряжения пробоя.

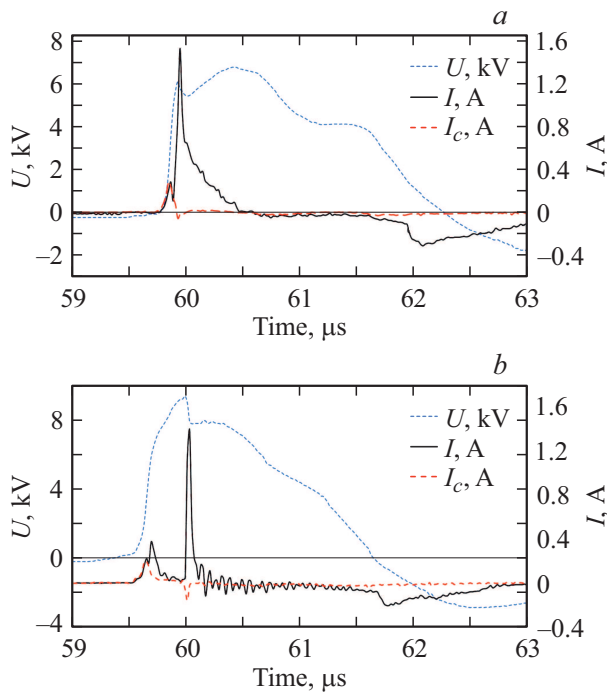
Также из осциллограмм тока и напряжения рассчитывались значения протекшего заряда и вложенной энергии в зависимости от времени. При использовании материала с частично изолированными порами значения тока, заряда и вложенной энергии оказывались на порядок ниже, так как реально в пробое участвовала только открытая часть пор, где давление понижалось до уровня окружающего.

Полученные данные по напряжению пробоя сравнивались с расчетными, полученными в приближении одинаковых пор с размером, равным среднему размеру пор в материале, определенному из микрофотографии. Для расчета использовалась формула Пашена, адаптированная для барьерного разряда в микрозазорах, описанная в работах [4,5]:

$$U = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln\left(\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right)},$$

$$A = 14.73(\text{Torr} \cdot \text{cm})^{-1},$$

$$B = 450 \text{ V}/(\text{Torr} \cdot \text{cm})$$



**Рис. 1.** Осциллограммы напряжения  $U$ , измеренного тока  $I$  и емкостного тока  $I_c$  для воздушного зазора (а) и зазора, заполненного пористым полиуретаном с полностью связанными порами (b). Среда — воздух, давление 80 Torr, зазор 0.25 см.

с переменным значением  $\gamma$ , убывающим при увеличении  $pd$  обратно пропорционально его квадрату:

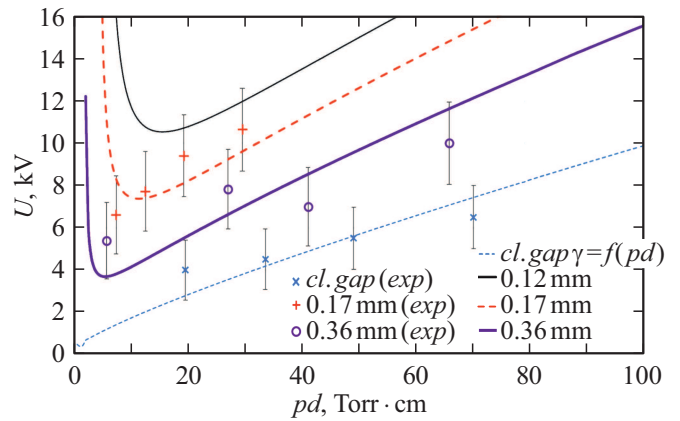
$$\gamma = \frac{1.67 \cdot 10^{-3} (\text{Torr} \cdot \text{cm})^2}{(pd)^2}.$$

В качестве толщины зазора ( $d$ ) берется размер поры, а полное напряжение рассчитывается как произведение напряжения на одной поре на их количество, укладываемое в зазор. Такие зависимости напряжения пробоя в разрядном зазоре, заполненном пористым диэлектриком, для различных размеров пор представлены на рис. 2.

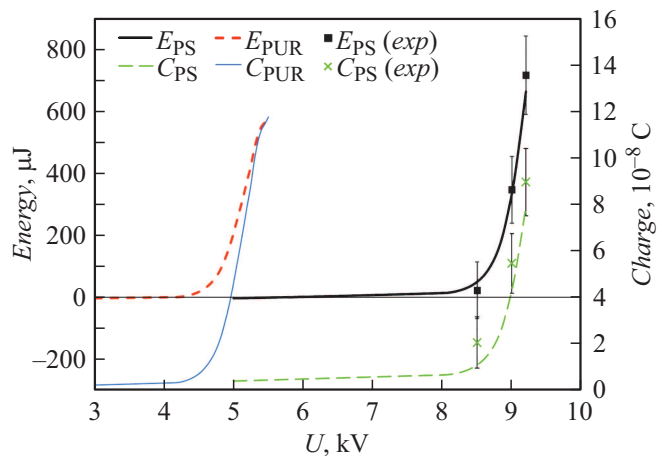
Для экспериментальных данных брался средний размер пор. Приведены также кривые для воздушного промежутка без пористого диэлектрика ( $cl. gap$ ): среда — воздух, зазор 0.25 см. Такое простое приближение дает неплохое совпадение с экспериментальными результатами, несмотря на существенное отличие исследуемого диапазона  $pd$  от того, в котором была первоначально получена формула Пашена [4,5], используемая в расчетах. Для более детального описания процесса пробоя и лучших оценок его параметров была разработана простая полуэмпирическая модель, описывающая пробой пористого диэлектрика с гауссовым распределением пор по размерам, параметры которого подбираются близкими к реальному (полученному при помощи микрофотографий). В модели поры разного размера формируют вертикальные столбики или последовательно соединенные конденсаторы, напряжение на которых

рассчитывалось с учетом их емкости. При превышении пашеновского порога пробоя [4,5] поры напряжение на ней приравнивалось к нулю и пересчитывались напряжения на остальных порах до момента прекращения пробоя. В результате рассчитывались протекший заряд и вложенная энергия в зависимости от приложенного напряжения. Результаты моделирования для полистирола (средний диаметр пор 0.17 mm) и полиуретана (средний диаметр пор 0.36 mm) приведены на рис. 3.

Закрытость части пор в реальном образце резко снижает реальный ток и протекший заряд по сравнению с расчетными величинами, поскольку реально пробой происходит только в открытой части пор, где давление воздуха ниже. Однако расчетное значение напряжения пробоя, соответствующее значению напряжения, когда про-



**Рис. 2.** Сравнение оценки зависимости напряжения пробоя разрядного промежутка, заполненного пористым диэлектриком с порами размером 0.12, 0.17, 0.36 mm, и воздушного разрядного промежутка ( $cl. gap$ ) от произведения давления на толщину зазора для различных размеров пор с экспериментальными данными ( $exp$ ).



**Рис. 3.** Расчет вложенной энергии и протекшего заряда от напряжения на разрядном промежутке, заполненном пористым полистиролом (PS, средний диаметр пор 0.17 mm) и пористым полиуретаном (PUR, средний диаметр пор 0.36 mm). Среда — воздух, давление 80 Torr, зазор 0.25 см.

тек существенный (например, 20% от максимального) заряд, достаточно близко к измеренному экспериментально.

Для материала с открытыми порами модель дает хорошее количественное совпадение протекшего заряда ( $6.6 \mu\text{C}$  — расчет,  $7.5 \mu\text{C}$  — эксперимент) и вложенной энергии ( $8.0 \text{ mJ}$  — расчет,  $7.2 \text{ mJ}$  — эксперимент) в момент, когда напряжение достигло максимального значения  $9.2 \text{ kV}$ .

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. В работе были проведены эксперименты по определению пробойного напряжения в образцах из пенополистирола и пористого полиуретана в импульсном барьерном разряде при разных давлениях воздуха.

2. Выполнено исследование электрических параметров разряда в пористом материале в зависимости от размера и типа пор.

3. Проведены оценочные расчеты кривых Пашена для зазора, заполненного пористым диэлектриком в приближении одинаковых пор. Получено хорошее совпадение с результатами эксперимента.

4. Предложена удобная полуэмпирическая модель развития пробоя в пористом диэлектрике с распределением пор по размерам, близким к реальному. Получено хорошее количественное совпадение с экспериментом для величины напряжения пробоя. Для материала со связанными порами получено хорошее количественное согласие с экспериментом для величин протекшего заряда и вложенной энергии.

### Финансирование работы

Работа выполнена при частичной поддержке НИЦ „Курчатовский институт“ (приказ № 2073 от 09.10.2020 г.).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] F. Paschen, *Ann. Phys.*, **273** (5), 69 (1889). DOI: 10.1002/andp.18892730505
- [2] L.F. Berzak, S.E. Dorfman, S.P. Smith, *Paschen's law in air and noble gases* (Lawrence Berkeley National Laboratory, 2006).
- [3] A.M. Loveless, A.L. Garner, *Phys. Plasmas*, **24** (11), 113522 (2017). DOI: 10.1063/1.5004654
- [4] А.А. Книжник, С.В. Коробцев, Д.Д. Медведев, Б.В. Потопкин, Н.К. Белов, *Письма в ЖЭТФ*, **111** (5), 305 (2020). DOI: 10.31857/S0370274X20050069
- [5] A.A. Knizhnik, S.V. Korobtsev, D.D. Medvedev, B.V. Potapkin, N.K. Belov, O.O. Grankina, *AIP Adv.*, **10** (8), 085119 (2020). DOI: 10.1063/5.0010056