

06.4;12.1

## Радиоизлучение, создаваемое электрическим пробоем пленки полипропилена

© В.А. Пахотин<sup>1</sup>, Н.Т. Сударь<sup>2</sup><sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: v.pakhotin@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 19 июня 2020 г.

В окончательной редакции 3 августа 2020 г.

Принято к публикации 5 августа 2020 г.

При электрическом пробое тонкой пленки полипропилена обнаружено излучение радиоимпульса длительностью около 400 ns. Спектр радиоимпульса состоит из трех основных частот. Обоснована связь величины сопротивления канала пробоя с наблюдаемым спектром излучения.

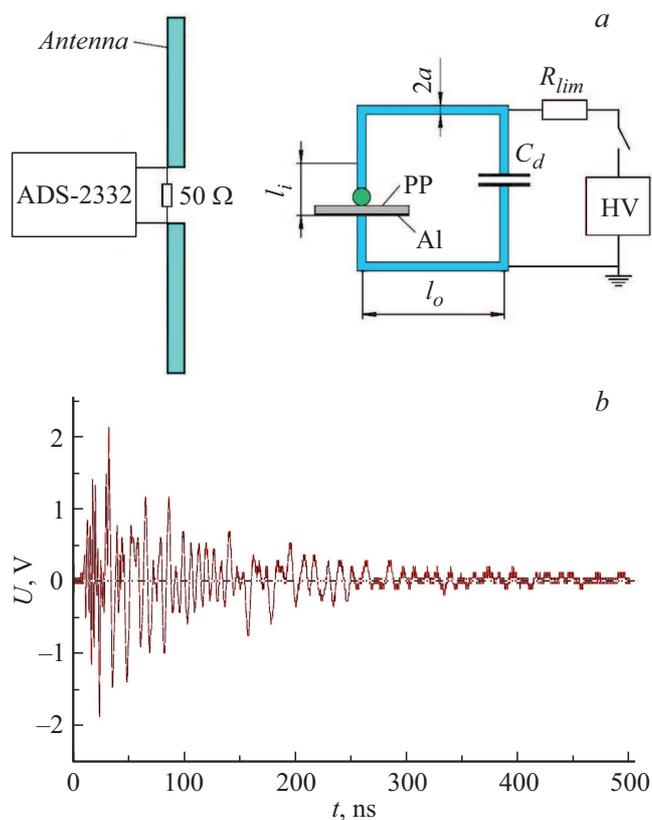
**Ключевые слова:** электрический пробой, радиоизлучение, полипропилен.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.22.50306.18428

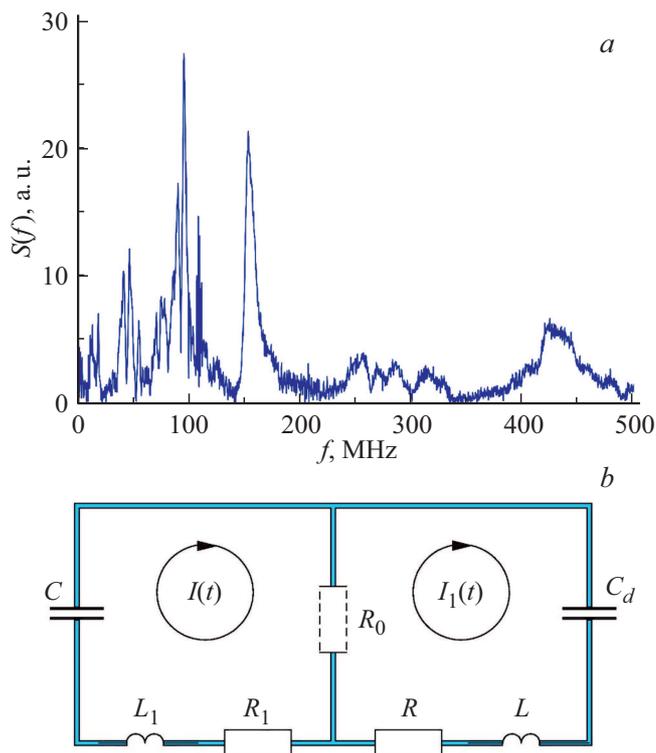
Завершающей стадией электрического разрушения полимерных диэлектрических пленок является их электрический пробой. При пробое в локальной области пленки возникает проводящий канал, сквозь который могут протекать токи большой плотности. Ранее было установлено, что кратковременный фронт импульса истинного тока пробоя инициирует в измерительной электрической цепи затухающие электрические колебания [1,2]. Показано, что данные о частоте колебаний и времени их затухания могут быть использованы для определения сопротивления проводящего канала и оценки скорости его изменения [2]. Импульс тока электрического пробоя полимерных пленок и колебания тока в измерительной цепи должны создавать излучение в радиодиапазоне, параметры которого также могли бы быть использованы для исследования пробоя полимерной пленки. Здесь следует отметить, что известно и широко обсуждается широкополосное излучение радиоволн при возникновении электрических разрядов [3–6], в том числе частичных разрядов в диэлектриках. Публикации, в которых рассматривались бы вопросы излучения радиоволн при пробое полимерных диэлектриков, отсутствуют. Поэтому целью настоящей работы является установление факта излучения радиоимпульса при электрическом пробое полимерной пленки, а также выяснение его параметров.

На рис. 1, а представлена схема измерений. Объектом нашего исследования являлась двухосно ориентированная пленка полипропилена (PP) толщиной  $4\ \mu\text{m}$ , на которую с одной стороны термическим напылением в вакууме наносился слой алюминия толщиной  $10\text{--}20\ \text{nm}$ . Пленка зажималась между двух латунных колец, внутренний диаметр которых равнялся  $30\ \text{mm}$ , так что пленка заполняла все пространство внутри кольца. Кольца имели прижимной электрический контакт со слоем Al. Слой Al являлся нижним электродом. В качестве второго (верхнего) электрода использовался стальной шар диаметром  $4\ \text{mm}$ , который был завальцован в медную

трубку. Шаровой электрод имел отрицательный потенциал и располагался примерно в центре латунного кольца. Электроды с образцом (измерительная ячейка) были частью установки, имеющей форму квадратной рамки с длиной плеча  $l_0 = 40\ \text{mm}$ . Рамка была изготовлена из медного провода диаметром  $2a = 5\ \text{mm}$  и соединялась с шаровым электродом посредством медной



**Рис. 1.** а — схема измерительной установки. б — осциллограмма регистрируемого радиоимпульса при пробое пленки PP. Пробивное напряжение  $U_{br} = 2800\ \text{V}$ .



**Рис. 2.** *a* — спектр приведенного на рис. 1, *b* радиоимпульса. *b* — эквивалентная электрическая схема установки.

трубки. Нижний плоский торец провода рамки был прижат к слою Al. Таким образом, слой Al обеспечивал плотный контакт измерительной цепи с поверхностью полимера. Центр шарового электрода располагался на геометрической оси провода рамки. Все электрические испытания проводились в среде конденсаторного масла, что исключало возникновение краевых и поверхностных разрядов. Параллельно исследуемому образцу подключался конденсатор  $C_d$ , емкость которого составляла 56 pF. Высокое напряжение (HV) подавалось на исследуемый образец через ограничивающий резистор  $R_{lim}$  сопротивлением  $10^{11} \Omega$ . Среднее значение пробивного напряжения  $U_{br}$  составило  $2700 \pm 100$  V. В отличие от предыдущих схем измерений здесь измерительное сопротивление отсутствует, т.е. равно нулю. В месте пробоя в пленке возникал сквозной канал (канал пробоя) диаметром около  $10 \mu\text{m}$ , вокруг которого слой Al испарялся. Диаметр деметаллизированной области составлял около  $100 \mu\text{m}$ .

Для регистрации радиоизлучения без искажений необходимо использовать приемную антенну, согласованную со спектром излучения конкретной экспериментальной установки. Расчет параметров антенны был сделан на основе данных о спектре колебаний измерительной цепи. В работе [2] с использованием измерительного сопротивления установлено, что частота колебаний тока находится в диапазоне 90–200 MHz. Поэтому приемная антенна представляла собой вертикальный симметрич-

ный вибратор диаметром 70 mm с длиной плеча 560 mm (резонансная частота 134 MHz). Антенна работала в аperiодическом режиме и подключалась к запоминающему осциллографу ADS-2332 коаксиальным кабелем длиной 1 m, зашунтированным с двух концов резисторами  $50 \Omega$  (рис. 1, *a*). Это позволило регистрировать радиоволны в диапазоне частот 50–500 MHz.

При электрическом пробое пленки PP были зарегистрированы радиоимпульсы длительностью около 400 ns и амплитудой до 2 V. Максимальная амплитуда импульса зависела от величины  $U_{br}$ . Типичная форма регистрируемого радиоимпульса представлена на рис. 1, *b*. Он имеет вид осциллирующего и затухающего по амплитуде сигнала, частота колебаний которого со временем изменяется. Сравнение его с осциллограммой сигнала, регистрируемого в электрической цепи при пробое полимерной пленки [1], показывает значительное сходство их формы и длительности. Это свидетельствует о правильном выборе приемной антенны. Спектр радиоимпульса представлен на рис. 2, *a*. Анализ спектра отдельных частей осциллограммы показал, что высокочастотное излучение с центральной частотой  $f_H = 416$  MHz и низкочастотное с частотой  $f_L = 90$  MHz наблюдаются в начальной части осциллограммы в течение приблизительно 80 ns, так что эти колебания накладываются друг на друга. После затухания указанных колебаний появилось излучение с частотой  $f_M = 147$  MHz, длительность которого составляет около 50 ns. Далее опять возникло излучение на частоте 90 MHz, из которого сформирована завершающая часть радиоимпульса.

В отличие от предыдущих измерений при пробое обнаружены колебания с относительно высокой частотой, существующие одновременно с низкочастотными колебаниями в передней части осциллограммы радиоимпульса. Для выявления связи сопротивления канала пробоя с характеристиками колебаний в [2] предложена эквивалентная электрическая схема (ЭС). Чтобы объяснить излучение на частотах 400–500 MHz, необходимо высокочастотным контуром. Из общих соображений следует, что при пробое тонкого полимерного образца LC-контур с резонансной частотой 416 MHz должен иметь индуктивность, существенно меньшую индуктивности всей установки, имеющей форму квадратной рамки (рис. 1, *a*). По нашему мнению, этот контур образован емкостью и индуктивностью электродов измерительной ячейки и проводников, прилегающих непосредственно к электродам измерительной ячейки. Этот же контур будет являться эквивалентным контуром высокочастотного излучающего вибратора длиной  $l_i \approx 15$  mm (высота измерительной ячейки). В работах [1,2] индуктивность электродов измерительной ячейки не учитывалась. Источником низкочастотных составляющих спектра радиоимпульса являются затухающие колебания в квадратной рамке.

Эквивалентную схему установки можно представить в виде, показанном на рис. 2, *b*, где  $C$  — емкость

высокочастотного контура,  $L_1$  — индуктивность высокочастотного контура,  $R_0$  — сопротивление канала пробоя,  $L$  — индуктивность квадратной рамки (рис. 1),  $R$  и  $R_1$  — активные сопротивления проводников,  $I(t)$ ,  $I_1(t)$  — контурные токи. Качественно процесс возникновения колебаний можно представить следующим образом. При пробое за очень короткое время сопротивление образца изменяется от  $R_{inf}$  до  $R_0$ , причем  $R_{inf} \gg R_0$ . При этом конденсаторы  $C$  и  $C_d$ , заряженные до напряжения пробоя  $U_{br}$ , разряжаются. Наличие индуктивностей и емкостей приводит к возникновению затухающих колебаний. Если  $R_0$  мало, то ток  $I(t)$  является наиболее высокочастотным, в то время как ток  $I_1(t)$  является низкочастотным. Поэтому в процессе радиоизлучения должны наблюдаться одновременно и низкая, и высокая частоты. Когда  $R_0$  велико, через него протекает пренебрежимо слабый ток. В ЭС остается один общий контур с промежуточной резонансной частотой. Если  $R_0$  не очень велико и контуры не являются зеркально симметричными, то существуют колебания на двух близких промежуточных частотах.

В результате можно сделать вывод, что частота излучения радиоволн определяется сопротивлением канала пробоя. Таким образом, по частоте излучения можно судить о величине сопротивления канала пробоя. Для количественных оценок были рассчитаны резонансные частоты ЭС  $f$ , которые очень близки к частотам затухающих колебаний. Резонансные частоты при произвольном  $R_0$  находились путем приравнивания к нулю мнимых частей импедансов контуров ЭС  $Z$  (со стороны конденсатора  $C_d$ ) и  $Z_1$  (со стороны конденсатора  $C$ ). В случае  $R_0 = 0$  ЭС распадается на два независимых контура с резонансными частотами

$$f_H = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_1 C}} \text{ для } Z_1,$$

$$f_L = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L C_d}} \text{ для } Z.$$

Когда  $R_0 = \infty$ , ЭС превращается в последовательный контур с резонансной частотой

$$f_M = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C + C_d}{C C_d (L + L_1)}}.$$

Резонансные частоты, соответствующие крайним значениям сопротивления канала ( $R_0 = 0, \infty$ ), приравнивались к частотам спектральных составляющих излучения. Таким способом была сформирована система трех уравнений для нахождения реактивных параметров излучающей системы  $C$ ,  $L_1$  и  $L$ , необходимых для определения сопротивления канала пробоя. Полученные параметры  $C$ ,  $L_1$  и  $L$  подставлялись в выражения для импедансов ЭС с целью нахождения резонансных частот уже при произвольном  $R_0$ . При решении этой задачи активные сопротивления  $R$  и  $R_1$  находились путем суммирования

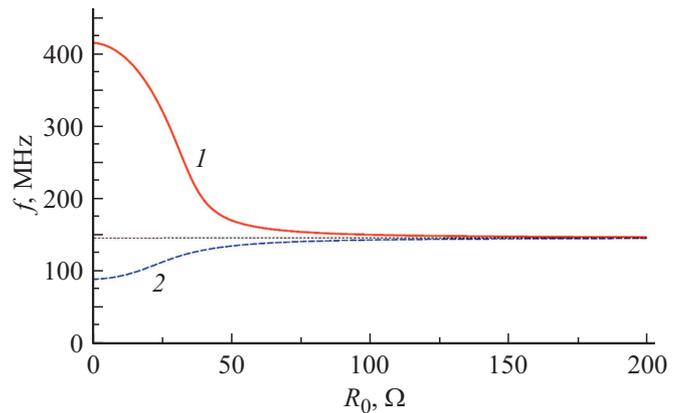


Рис. 3. Зависимость резонансной частоты от величины сопротивления канала пробоя в высокочастотном контуре (1) и низкочастотном контуре (2).

сопротивлений проводников с учетом глубины поверхностного эффекта и сопротивления излучения квадратной рамки и высокочастотного вибратора. Полученные алгебраические уравнения для  $f$  не приводятся из-за большого объема. Эти уравнения решались численно при различном  $R_0$ . Далее строилась зависимость частот колебаний от сопротивления канала (рис. 3). Было найдено, что частотам  $f_L = 90$  МГц и  $f_H = 416$  МГц соответствует  $R_0 \sim 1$  Ом, а частоте  $f_M = 147$  МГц отвечает  $R_0 \geq 100$  Ом. Как видно из осциллограммы, сопротивление канала существенно изменяется во времени. Интересно, что излучение с частотой  $f_M$ , соответствующее относительно высокому сопротивлению канала, четко воспроизводится не в конце осциллограммы, а в средней ее части. Это значит, что на данном отрезке времени сопротивление канала резко возросло, а затем опять уменьшилось. Подобное поведение наблюдалось для всех испытанных образцов РР. Можно предположить, что в конце процесса пробоя сопротивление канала существенно возрастает, что должно сопровождаться появлением излучения на частоте 147 МГц. Скорее всего, так и происходит, но к этому времени энергия, запасенная в контуре, заметно рассеивается, и излучение на этой частоте становится ниже уровня шумов.

Таким образом, в работе зарегистрировано радиоизлучение, возникающее при пробое пленки РР. Основные спектральные пики наблюдаются на частотах 90, 147 и 416 МГц. Анализ электрических и радиотехнических характеристик экспериментальной установки дает основание полагать, что радиоизлучение обусловлено электрическими колебаниями тока пробоя в экспериментальной установке. Основная мощность выделяется в канале пробоя в результате протекания токов на частотах 416 и 90 МГц в первые 80 нс. При пробое пленки РР обнаружено немонотонное изменение сопротивления канала пробоя: резкое кратковременное увеличение сопротивления на фоне практически постоянного сопротивления, равного  $\sim 1$  Ом. Можно предполагать, что возрастание

сопротивления вызвано кратковременным образованием плохопроводящего слоя на электродах измерительной ячейки. Целесообразно использовать радиоизлучение для исследования электрического пробоя, поскольку принятые сигналы хорошо воспроизводят колебания в реальной установке и этот метод более безопасен по сравнению с контактными измерениями. Использование радиоизлучения позволяет измерять токи одновременно во всех конутрах установки. По методике измерительных сопротивлений это сделать практически невозможно, что приводит к недостаточно полному представлению о протекающем процессе пробоя. В дальнейшем необходимо разработать методику, позволяющую определить влияние скорости изменения сопротивления канала пробоя на спектрально-временные характеристики регистрируемого радиоизлучения. Исследование закономерностей изменения сопротивления канала необходимо для детализации физического механизма пробоя полимеров и разработки путей повышения электрической прочности изоляции.

Можно отметить, что некоторые параметры заключительной стадии электрического пробоя диэлектриков указывают на схожесть этого процесса с процессом электрического взрыва тонкой металлической проволоочки [7]. По-видимому, радиоизлучение, которое должно возникать при электрическом взрыве проводников, также несет информацию об изменении сопротивления проводника во времени.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] Пахотин В.А., Закревский В.А., Сударь Н.Т. // ЖТФ. 2015. Т 85. В. 8. С 40–45.
- [2] Пахотин В.А., Сударь Н.Т. // ПТЭ. 2019. № 3. С. 30–37. <https://doi.org/10.1134/S0032816219020289>
- [3] Андреев Ю.А., Костыря И.Д., Кошелев В.И., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 5. С. 105–111.
- [4] Shibuya Y., Matsumoto S., Tanaka M., Muto H., Kaneda Y. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 2010. V. 17. N 3. P 862–871. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2010.5492260>
- [5] Zmarzly D., Nagi L., Borucki S., Boczar T. // Acta Phys. Pol. A. 2014. V. 125. N 6. P. 1377–1379. DOI:10.12693/APhysPolA.125.1377
- [6] Suwarno H. // Int. J. Electr. Eng. Inform. 2016. V. 8. N 1. P. 147–163. DOI: 10.15676/ijeei.2016.8.1.11
- [7] Орешкин В.И., Хищенко К.В., Левашов П.Р., Русских А.Г., Чайковский С.А. // ТВТ. 2012. Т. 50. № 5. С. 625–637.