

Научная статья
УДК: 621.315.6
DOI 10.18101/2306-2363-2025-2-36-40

**Изоляционный материал для модификации электрического поля
при воздействии импульсного напряжения**

© Радзивиллов Евгений Юрьевич

аспирант
evgeniy_25_11_1997@mail.ru

© Юдин Артем Сергеевич

кандидат технических наук, научный сотрудник
wm5@tpu.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30

Аннотация. В работе акцент сделан на решении проблемы повышения надежности и долговечности изоляционных материалов, используемых в электродных системах электроразрядных технологий. Для этого проведены эксперименты по модификации силиконовой резиновой смеси ИРП 1338 с использованием керамических наполнителей, таких как титанат бария и титанат бария, смешанный в планетарной мельнице с сажей для увеличения до заданных значений диэлектрической проницаемости. Результаты показывают, что добавление этих модификаторов значительно улучшает диэлектрическую проницаемость материалов, что делает их перспективными для применения в данных технологиях. Также приведены сравнительные исследования немодифицированной и модифицированной изоляции при воздействии импульсного напряжения. Полученные результаты позволили определить, насколько диэлектрическая проницаемость модифицированного образца способствует более равномерному распределению электрического поля и снижению локальных перенапряжений в условиях импульсного воздействия.

Ключевые слова: электроразрядные технологии, диэлектрическая проницаемость, электрическое поле, высоковольтная изоляция, полимерный композит, изоляционный материал, силикон.

Для цитирования

Радзивиллов Е. Ю., Юдин А. С. Изоляционный материал для модификации электрического поля при воздействии импульсного напряжения // Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика. 2025. Вып. 2. С. 36–40.

Современные механические способы обработки и переработки горных пород, такие как бурение, дробление и резание, практически исчерпали потенциал увеличения производительности и надежности, а также времени жизни рабочего инструмента. Анализ публикаций показывает высокую эффективность и интерес применения электроразрядных (ЭР) технологий для разрушения крепких горных пород [1–8]. Такие технологии по сравнению с традиционными способами механического разрушения материалов обладают значительными преимуществами: низкие энергетические затраты, избирательность разрушения неоднородных структур, отсутствие потребности в дорогостоящих твердосплавных и алмазных

инструментах, широкие возможности регулирования энерговклада и автоматизации процесса [9].

Вместе с тем не решена одна из важных проблем ЭР-технологий — изоляция. До сих пор не найден материал, который удовлетворял бы всем требованиям таких технологий и в первую очередь требованию длительной работы при импульсном напряжении, особенно с использованием воды в качестве рабочей среды.

Для решения данной проблемы предлагается модифицировать изоляцию, получив при этом заданное значение диэлектрической проницаемости. Изоляция с повышенной диэлектрической проницаемостью обеспечит более равномерное распределение электрического поля на поверхности за счет увеличения накопленных зарядов, что приведет к увеличению срока её службы.

В данной работе модификация силиконовой резиновой смеси ИРП 1338 осуществлялась путем механического смешивания данного силикона с порошком BaTiO_3 и BaTiO_3 , смешанного с сажей в планетарной мельнице. Процесс осуществлялся на прорезиненных валках при комнатной температуре с минимизацией образования воздушных пузырьков. Доля введенного титаната бария составила 65% общей массы (обр. № 26), а титаната бария с сажей — 42,9% общей массы (обр. № 27).

Затем образцы отверждали в печи (первый этап — 10 мин при 151°C , второй этап — 4 ч при 200°C) с дальнейшим испытанием на электрическую прочность и диэлектрическую проницаемость. Результаты эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты эксперимента

Модификация		Толщина (мм)	Емкость (пФ) (100 кГц)	Диэлектрическая проницаемость (ε)	Эл. прочность Епр (кВ/мм)
1	ИРП 1338 чистый	4	12,6	3,2	15,6
2	ИРП 1338 с BaTiO_3 (65%)	3,7	70,6	16,3	13,8
3	ИРП 1338 с BaTiO_3 , смешанный с сажей (42,9%)	3,4	37,5	8	15,2

В ходе исследования изучалось распределение электрического поля на поверхности изоляционного материала под действием импульсного напряжения в системе «жидкость — твердая изоляция». Полученные результаты позволили определить, насколько диэлектрическая проницаемость модифицированного образца способствует более равномерному распределению электрического поля и снижению локальных перенапряжений.

Снижение напряжения на поверхности модифицированного изоляционного материала (ИРП 1338 с 65% BaTiO_3) при использовании технической воды в качестве рабочей жидкости примерно на 31% способно существенно стимулиро-

вать развитие и внедрение электроразрядных технологий, например, в технологию бурения.

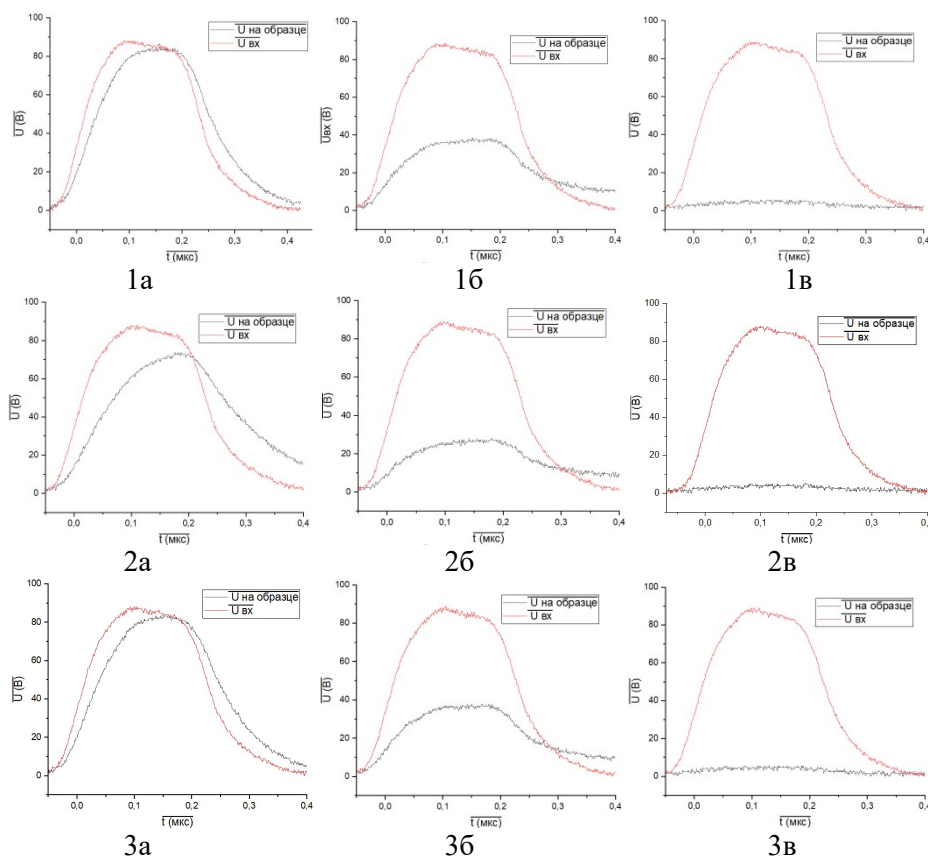


Рис. 1. Осциллограммы падения напряжения на поверхности образца в конфигурации твердая изоляция — жидкость, где образец: 1) чистый ИРП 1338; 2) ИРП 1338 с BaTiO_3 ; 3) ИРП 1338 с BaTiO_3 , смешанный с сажой; жидкость: а) техническая вода; б) дистиллированная вода; в) ПМС-100

Таблица 2

Падение напряжение на поверхности образца

Образец	Техническая вода			Дистиллированная вода			ПМС-100		
	$U_{\text{вх}}$ (кВ)	$U_{\text{вых}}$ (кВ)	% снижения напряжения	$U_{\text{вх}}$ (кВ)	$U_{\text{вых}}$ (кВ)	% снижения напряжения	$U_{\text{вх}}$ (кВ)	$U_{\text{вых}}$ (кВ)	% снижения напряжения
ИРП 1338 чистый	88	78,4	10,9	88	36	59,1	88,8	5,6	93,7
ИРП 1338 с BaTiO_3	88	60,8	30,9	88,8	25,6	71,2	88	4	95,5
ИРП 1338 с BaTiO_3 смешанный с сажой	88	77,6	11,8	88,8	36	59,5	88,8	4	95,5

Уменьшение напряжения на изоляции при сокращении длительности фронта импульса положительно влияет на срок службы высоковольтных электродов. Однако это приводит к необходимости увеличения напряжения в электроразрядных технологиях для разрушения твердых тел, что ведет за собой увеличение затрат. Исходя из этого, необходимо подбирать оптимальный баланс между уменьшением фронта волны и увеличением напряжения.

Литература

1. Воробьев А. А., Воробьев Г. А., Чепиков А. Т. Закономерность пробоя твердого диэлектрика на границе раздела с жидким диэлектриком при действии импульса напряжения // Свидетельство на открытие № А-122. 1998. Текст: непосредственный.
2. Ushakov V. Ya., Vazhov V. F., Zinoviev N. T. *Electro-Discharge Technology for Drilling Wells and Concrete Destruction*. Basel, Springer Nature Switzerland AG, 2019.
3. Anders E., Voigt M., Lehmann F. Electric Impulse Drilling: the Future of Drilling Technology Begins Now. *ASME. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Polar and Arctic Sciences and Technology; Petroleum Technology*. 2017; 008(11): 024. doi: 10.1115/OMAE2017-6110.
4. Molchanov D., Vazhov V., Lavrinovich I. et al. Downhole Generator Based on a Line Pulse Transformer for Electro Pulse Drilling. *2017 IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (PPC)*. Tomsk, 2017, pp. 1–4.
5. Kovalchuk B. M., Kharlov A. V., Vizir V. A. et al. *Rev. Sci. Instrum.* 2010; 81: 103506. doi:10.1063/1.3497307.
6. Lisitsyn I.V., Inoue H., Nishizawa I., Katsuki S., Akiyama H. Breakdown and Destruction of Heterogeneous Solid Dielectrics by High Voltage Pulses. *J. Appl. Phys.* 1998; 84: 6262. doi: 10.1063/1.368946.
7. Timoshkin V. I., Mackersie J. W., MacGregor S. J. Plasma Channel Miniature Hole Drilling Technology. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2004; 32: 2055. doi:10.1109/TPS.2004.835489.
8. Семкин Б. В., Усов А. Ф., Курец В. И. Основы электроимпульсного разрушения материалов. Санкт-Петербург: Наука, 1995. 276 с. Текст: непосредственный.
9. Усов А. Ф., Семкин Б. В., Зиновьев Н. Т. Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии. Санкт-Петербург: Наука, 2000. 160 с. Текст: непосредственный.

Статья поступила в редакцию 30.08.2025; одобрена после рецензирования 15.09.2025; принята к публикации 15.09.2025.

Insulating Material
for Modifying Electric Field Under Pulsed Voltage Exposure

Evgeny Yu. Radzivilov
Research Assistant
evgeniy_25_11_1997@mail.ru

Artyom S. Yudin
Cand. Sci. (Engineering), Researcher
wm5@tpu.ru

National Research Tomsk Polytechnic University
30 Lenina Prospect, Tomsk 634050, Russia

Abstract. The article focuses on improving the reliability and durability of insulating materials used in electrode systems of electric-discharge technologies. For this purpose we have conducted experiments on modification of silicone rubber compound IRP 1338 using ceramic fillers such as barium titanate, and barium titanate mixed in a planetary mill with carbon black in order to increase dielectric permittivity to specified values. The results show that the addition of these modifiers significantly improves dielectric permittivity of the materials, making them promising for application in these technologies. We have also conducted comparative studies on insulation without modifying additives and modified insulation under impulse voltage exposure. The obtained results allow us to determine how dielectric permittivity of the modified sample contributes to more uniform distribution of electric field and reduction of local overvoltages under impulse exposure.

Keywords: electric-discharge technologies, dielectric permittivity, electric field, high-voltage insulation, polymer composite, insulating material, silicone.

For citation

Radzivilov E. Yu., Yudin A. S. Insulating Material for Modifying Electric Field Under Pulsed Voltage Exposure. *Bulletin of Buryat State University. Chemistry. Physics.* 2025; 2: 36–40 (In Russ.).

The article was submitted 30.08.2025; approved after reviewing 15.09.2025; accepted for publication 15.09.2025.