

УДК 621.315.617.5:537.226.2
DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5071
Шифр специальности ВАК: 2.4.4
Научная статья

Модификация силикона для увеличения диэлектрической проницаемости

Е.Ю. Радзивиллов✉, А.С. Юдин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ evgeniy_25_11_1997@mail.ru

Аннотация. Актуальность. К электроразрядным технологиям проявляют интерес различные отрасли, включая строительную индустрию, благодаря экологичности и возможности точного регулирования энергетического воздействия. В последнее время этот интерес заметно возрос из-за резкого обострения экологических проблем и повышенного внимания к разработке новых экологически чистых технологий. Сейчас эти технологии активно исследуются в крупных лабораториях развитых стран. Современный анализ показывает, что, несмотря на усовершенствование инструментов для разрушения горных пород, износ оборудования и высокие затраты на глубинах ограничивают эффективность традиционных методов, которые приближаются к своему техническому пределу. Применение электроразрядных технологий перспективно для бурения скважин в скальных массивах крепких горных пород, разрушения строительных конструкций из бетона и железобетона, дробления различных непроводящих материалов и извлечения ценных полезных ископаемых из руды. При появлении изоляционного материала, способного длительно работать в качестве высоковольтной изоляции электродов в воде, может быть дан значительный импульс к развитию электроразрядных технологий бурения, дробления, резания и снятия поверхностного слоя. **Цель.** Создание изоляционного материала с заданной диэлектрической проницаемостью, с высокой стойкостью к воздействию частичных и поверхностных разрядов, способную выдерживать высокие температуры при эксплуатации в электроразрядных технологиях для их широкого внедрения в промышленность. **Методы.** Модифицирование силиконовой резиновой смеси ИРП 1338 путем добавления титаната бария (BaTiO_3) и порошка с химическим составом $\text{K}_x\text{Fe}_y\text{Ti}_{8-y}\text{O}_{16}$ ($x=1,4-1,8$, $y=1,2-1,6$). **Результаты и выводы.** Предложены и проведены исследования по модификации силиконовой резиновой смеси ИРП 1338 с целью увеличения до заданных значений диэлектрической проницаемости. В результате проведенных экспериментов достигнуто повышение диэлектрической проницаемости до 23,8 при частоте 1 МГц.

Ключевые слова: электроразрядные технологии, диэлектрическая проницаемость, высоковольтная изоляция, полимерный композит, изоляционный материал

Для цитирования: Радзивиллов Е.Ю., Юдин А.С. Модификация силикона для увеличения диэлектрической проницаемости // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 8. – С. 227–233. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5071

UDC 621.315.617.5:537.226.2
DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5071
Scientific paper

Silicone modification to increase dielectric permittivity

E.Yu. Radzivilov✉, A.S. Yudin

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ evgeniy_25_11_1997@mail.ru

Abstract. Relevance. Toward electrodischarge technologies, interest is being shown by various sectors, including construction, because of environmental safety and the capability for precise control of energy impact. Recently, this interest has grown markedly due to the sharp rise in ecological problems and increased attention to developing new ecologically clean

technologies. Currently, these technologies are being actively studied in major laboratories across developed countries. Modern analysis shows that despite improvement of tools for destruction of rocks, wear of equipment and high costs at depths limit effectiveness of traditional methods, which are approaching their technical limit. The use of electrodischarge technologies shows promise for drilling wells in hard rock formations, demolishing concrete and reinforced concrete structures, crushing various non-conductive materials, and extracting valuable minerals from ore. The emergence of an insulating material capable of long-term operation as high-voltage insulation for electrodes in water could give a significant boost to the development of electric discharge technologies for drilling, crushing, cutting, and surface layer removal. **Aim.** Creation of insulating material with specified dielectric permeability, with high resistance to impact of partial and surface discharges, capable of withstanding high temperatures during operation in electric discharge technologies for their wide introduction into industry. **Methods.** Modification of silicone rubber compound IRP 1338 through addition of barium titanate (BaTiO_3) and powder with the chemical composition $\text{K}_x\text{Fe}_y\text{Ti}_{8-y}\text{O}_{16}$ ($x=1.4-1.8$, $y=1.2-1.6$). **Results and conclusions.** The authors have proposed and conducted the researches on modification of silicone rubber mixture IRP 1338 for increasing the specified values of dielectric permeability. They achieved the increase of dielectric permeability to 23.8 at frequency of 1 MHz.

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

For citation: Radzivilov E.Yu., Yudin A.S. Silicone modification to increase dielectric permittivity. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 8, pp. 227–233. DOI: 10.18799/24131830/2025/8/5071

Введение

Применение электрической энергии для разрушения твердых диэлектрических материалов и горных пород считается одним из наиболее перспективных направлений. В частности, метод разрушения твердых тел с помощью электрических импульсных разрядов, разработанный в Томском политехническом институте под руководством профессора А.А. Воробьева, является ярким примером такого подхода [1, 2].

В последние десятилетия значительно возрос интерес к использованию высоковольтной импульсной технологии для разрушения горных пород. Электрические импульсы доказали свою эффективность как один из наиболее результативных способов дезинтеграции минералов [3–5]. Современные исследования сосредоточены на таких областях, как бурение скважин, дезинтеграция, разрушение бетона и железобетонных конструкций, а также утилизация электронных устройств и других аналогичных задачах. Исследования проводятся в таких странах, как Россия, Германия, Швейцария, Япония, Китай и других.

Электроразрядные технологии обладают рядом преимуществ перед традиционными методами разрушения материалов: они характеризуются низкими энергозатратами, способностью к избирательному разрушению неоднородных структур, а также отсутствием необходимости применения дорогостоящих и дефицитных инструментов, таких как твердосплавные или алмазные. Кроме того, эти технологии позволяют гибко регулировать и автоматизировать процессы, исключают выделение вредных веществ, разрушительных акустических и сейсмических волн, а также обеспечивают точный контроль над вложением энергии. Эти особенности давно привлекают внимание специалистов в области строительства [6, 7]. В последнее время интерес

к таким технологиям значительно возрос из-за обострения экологических проблем и повышенного внимания к разработке экологически безопасных методов. В связи с этим исследования в области электроразрядных технологий активно ведутся в ряде крупных лабораторий [8].

Однако следует отметить, что как в России, так и за границей, производственное использование электроимпульсных установок пока что не стало широко распространенным. Одной из основных преград для массового внедрения электроразрядных технологий является проблема с изоляцией. Для ее решения предлагается модифицировать силикон, достигнув заданного уровня диэлектрической проницаемости. Это, в свою очередь, будет способствовать увеличению срока службы изоляции, снижению энергетических потерь и повышению производительности.

Повышенный интерес к полимерным материалам с высокой диэлектрической проницаемостью во многом объясняется их гибкостью и простотой изготовления изделий разнообразных форм и размеров. Тем не менее сами по себе полимеры обладают крайне низкой диэлектрической проницаемостью. В связи с этим полимерные композиты, содержащие различные наполнители, вызывают особый интерес благодаря их потенциальному применению в электроразрядных технологиях. Основными достоинствами таких композитов являются улучшенные диэлектрические характеристики в сочетании с высокими механическими свойствами. Однако создание полимерных композитов, которые одновременно обладают высокой диэлектрической проницаемостью и сохраняют гибкость, остается сложной и многогранной задачей.

При появлении изоляционного материала, способного длительно работать в качестве высоковольтной изоляции электродов в воде, может быть

дан значительный импульс развитию электроразрядных технологий бурения, дробления, резания и снятия поверхностного слоя.

Чтобы увеличить диэлектрическую проницаемость сополимера, Чжан и др. предложили добавлять специальные компоненты с высокой диэлектрической проницаемостью, такие как фталоцианин меди [9]. Не так давно диоксид титана (TiO_2) был исследован в качестве керамического наполнителя для мягкой полидиметилсилоксановой матрицы с целью разработки эластомерного композита с улучшенными электромеханическими характеристиками [10].

Несмотря на значительное количество исследований по разработке изоляционных материалов с высокой диэлектрической проницаемостью [11–17], для рассматриваемого диапазона (выше 1 кГц) их характеристики остаются неудовлетворительными (значение диэлектрической проницаемости не превышает 32 при 1 кГц и снижается с увеличением частоты).

В работе [18] диэлектрическая проницаемость поливинилбутирала, модифицированного порошком с химическим составом $\text{K}_{1,46}\text{Ti}_{7,2}\text{Fe}_{0,8}\text{O}_{16}$, составляет 135,6 при частоте 100 Гц, однако электрическая прочность данного материала не установлена.

Также в работе [19] достигнуты наилучшие результаты – диэлектрическая проницаемость полиимида, легированного модифицированным диоксидом кремния с наночастицами карбида титана, составляет 52 при частоте 1 кГц (при увеличении частоты диэлектрическая проницаемость значительно уменьшается).

Подводя итог, перечисленные выше материалы демонстрируют недостаточную диэлектрическую проницаемость в высокочастотном диапазоне (свыше 1 кГц).

На электрическую прочность материала существенным образом влияют:

- микро- и макропоры и трещины;
- наличие воздушных и проводящих включений;
- прочность химических связей в материале, т. к. механизм пробоя твердого диэлектрика заключается в разрыве химических связей внутри материала под воздействием приложенного напряжения.

Методика

В данной работе было предложено несколько вариантов модификации силиконовой резиновой смеси ИРП 1338 титанатом бария (BaTiO_3) и порошком с химическим составом $\text{K}_x\text{Fe}_y\text{Ti}_{8-y}\text{O}_{16}$ ($x=1,4-1,8$, $y=1,2-1,6$). При выборе модификаторов учитывались их высокие значения диэлектрической проницаемости, а также удобство в процессе применения.

Титанат бария (BaTiO_3), получаемый сплавлением титанового ангидрида с карбонатом бария, представляет собой наиболее распространенный сегнетоэлектрический наполнитель со спонтанной поляризацией. Титанат бария представляет собой диэлектрик с высоким уровнем диэлектрической проницаемости (1400 ± 250 при н.у.). Плотность титаната бария составляет $5,6-5,9 \text{ г/см}^3$.

В данной работе применялся BaTiO_3 с тетрагональной структурой, имеющий удельную поверхность $2,4 \text{ м}^2/\text{г}$ (метод BET), размер частиц которого составляет: 1 мкм (по данным прибора «SediGraph»); 0,5 мкм (по нашим данным, полученным на растровом электронном микроскопе).

Также применялся порошок титаната калия, допированный железом, со структурой голландита $\text{K}_x\text{Fe}_y\text{Ti}_{8-y}\text{O}_{16}$ (KFTO) ($x=1,4-1,8$, $y=1,2-1,6$). Порошок KFTO имеет монофазную тетрагональную структуру. Плотность данного порошка составляет $3,85 \text{ г/см}^3$ [20].

В данной работе измерение емкости (C) производилось на трех частотах (1 кГц, 100 кГц, 1 МГц) при комнатной температуре с помощью измерителя иммитанса E7-20.

Образцы помещаются в специальную ячейку, которая представляет собой простой плоский конденсатор с круглыми электродами диаметром 48 мм, между которыми были зажаты образцы дискообразной формы. Толщина образца, определяемая расстоянием между электродами, измерялась штангенциркулем.

Затем рассчитывалась диэлектрическая проницаемость из формулы емкости плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot S}{d} \Rightarrow \varepsilon = \frac{C \cdot d}{\varepsilon_0 \cdot S},$$

где C – емкость; ε – диэлектрическая проницаемость; ε_0 – электрическая постоянная ($8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$); S – площадь электродов; d – расстояние между электродами (толщина диэлектрического материала).

Измерение пробивного напряжения производилось при комнатной температуре прибором АИМ-90. Образцы помещались в измерительную ячейку, представляющую собой емкость с электродами, расположенными на фиксированном расстоянии друг от друга.

Затем можно рассчитать электрическую прочность материала:

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{d},$$

где E_{np} – электрическая прочность; U_{np} – пробивное напряжение; d – толщина диэлектрического материала.

Образцы с наилучшими показателями были исследованы на сканирующем электронном микроскопе «Hitachi S-3400N» с приставкой энергодисперсионного микроанализа фирмы Bruker.

Модификация силиконовой резиновой смеси ИРП 1338

Модификацию силиконовой резиновой смеси ИРП 1338 производили путем механического смешивания исходного силикона с порошками BaTiO_3 и KFTO на прорезиненных валках при комнатной температуре, минимизируя образование воздушных пузырей. Доля введенного титаната бария составила 35,7; 52,4; 59,1; 68,9; 69,2; 76,5 % от общей массы (таблица, обр. № 1–6), а титаната калия 58,3 и 60 % от общей массы (таблица, обр. № 7, 8).

Затем образцы отверждали в печи (первый этап 10 минут при 151 °С, второй этап 4 часа при 200 °С) с дальнейшим испытанием на электрическую прочность и диэлектрическую проницаемость. Результаты эксперимента представлены в таблице.

Таблица. Результаты эксперимента

Table. Experiment results

№	Модификация Modification	Диэлектрическая проницаемость Dielectric constant (ϵ)			Эл. прочность Епр (кВ/мм) Dielectric strength E (kV/mm)
		1 кГц 1 kHz	100 кГц 100 kHz	1 МГц 1 MHz	
1	ИРП 1338 с BaTiO_3 (35,7 %) IRP 1338 with BaTiO_3 (35.7%)	5,6	5,6	5,9	15,4
2	ИРП 1338 с BaTiO_3 (52,4 %) IRP 1338 with BaTiO_3 (52.4%)	11,4	11,3	11,9	12,5
3	ИРП 1338 с BaTiO_3 (59,1 %) IRP 1338 with BaTiO_3 (59.1%)	11,9	11,9	12,4	14,9
4	ИРП 1338 с BaTiO_3 (68,9 %) IRP 1338 with BaTiO_3 (68.9%)	15,1	15,1	15,7	12,5
5	ИРП 1338 с BaTiO_3 (69,2 %) IRP 1338 with BaTiO_3 (69.2%)	16,8	17,3	17,4	11,6
6	ИРП 1338 с BaTiO_3 (76,5 %) IRP 1338 with BaTiO_3 (76.5%)	23,4	23,1	23,8	12,4
7	ИРП 1338 с KFTO (58,3 %) IRP 1338 with KFTO (58.3%)	5,7	5,5	5,8	15
8	ИРП 1338 с KFTO (60 %) IRP 1338 with KFTO (60%)	7,5	7	7,3	15,3

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Исследование показало значительный рост диэлектрической проницаемости при добавлении модифицирующего порошка BaTiO_3 к силиконовой резиновой смеси ИРП 1338 при концентрации выше 60 %, что привело к последующему значительному увеличению этого параметра. На основании полученных результатов было принято решение увеличить концентрацию порошка. Максимальное значение концентрации модифицирующего порошка без дополнительных манипуляций составило 69,2 % от общей массы, поскольку при увеличении этого показателя образец терял свою вязкость и начинал разрушаться. Исходя из этого было принято решение покрыть порошок BaTiO_3 стеариновой кислотой для увеличения его лиофильных свойств. Данное решение позволило увеличить концентрацию порошка BaTiO_3 до 76,5 % с дальнейшим увеличением диэлектрической проницаемости (таблица, обр. № 6).

Несмотря на предпринятые меры для предотвращения образования воздушных включений при изготовлении образцов из силиконовой резиновой смеси ИРП 1338, в образцах по-прежнему наблюдаются данные включения (рис. 1, б).

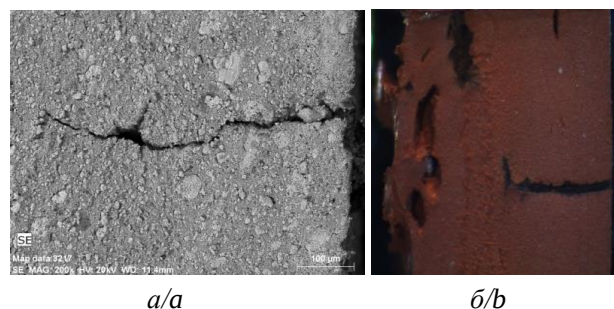


Рис. 1. Внешний вид образцов в месте пробоя: а) ИРП 1338 с BaTiO_3 (76,5 %) (обр. № 6); б) ИРП 1338 с KFTO (60 %) (обр. № 8)

Fig. 1. Appearance of samples at breakdown: а) IRP 1338 with BaTiO_3 (76.5%) (sample no. 6); б) IRP 1338 with KFTO (60%) (sample no. 8)

При рассмотрении образца № 6 под микроскопом было выявлено большое количество крупных агломератов порошка титаната бария в силиконовой резиновой смеси ИРП 1338 (рис. 2, а).

При микроскопическом изучении образца № 8 была отмечена его плотная структура, что положительно влияет на электрическую прочность (рис. 3).

Также при микроскопическом анализе было выявлено образование агломератов порошка в силиконовой резиновой смеси ИРП 1338.

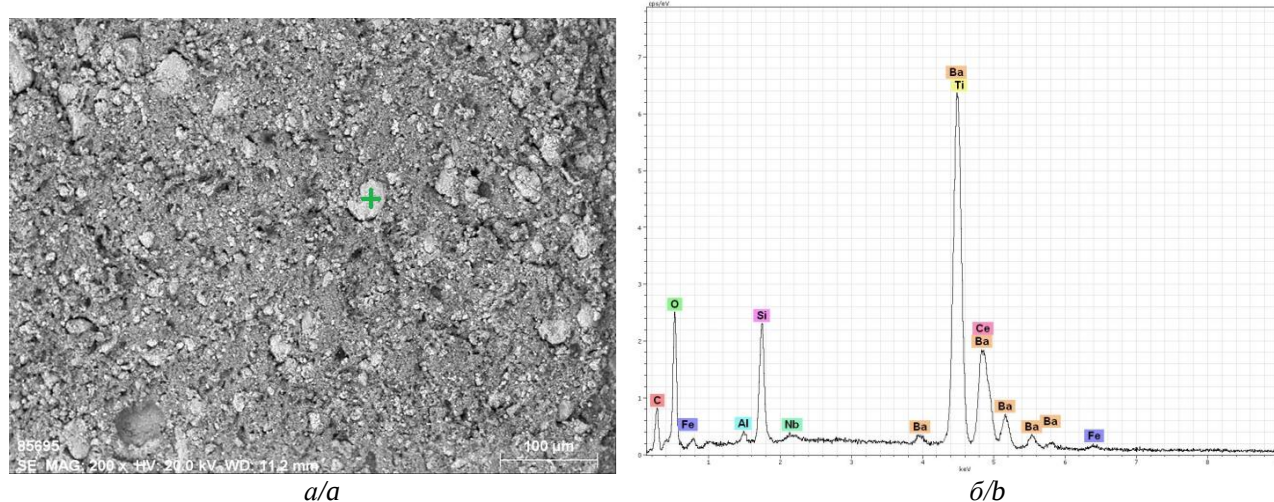


Рис. 2. Сканирующая электронная микроскопия образца ИРП 1338 с BaTiO₃ (76,5 %): а) место прохождения канала разряда; б) спектр точки на образце

Fig. 2. Scanning electron microscopy of the IRP 1338 sample with BaTiO₃ (76.5%): a) location of the discharge channel; b) point spectrum on the sample

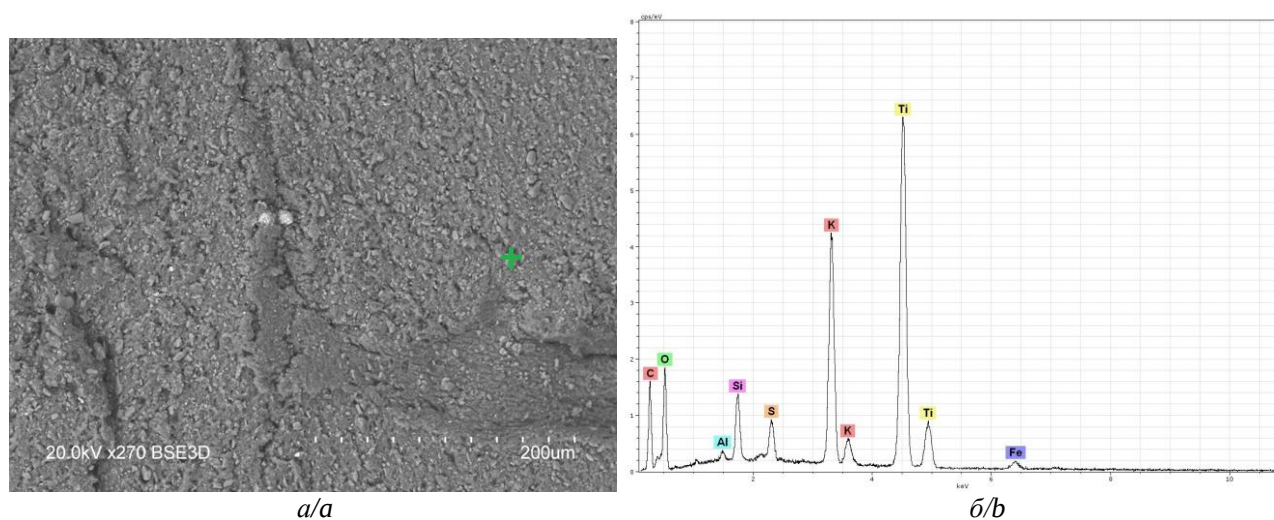
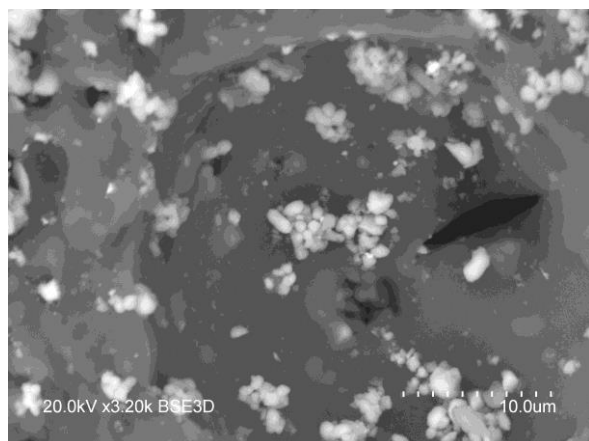


Рис. 3. Сканирующая электронная микроскопия образца ИРП 1338 с KFTO (60 %): а) место прохождения канала разряда; б) спектр точки на образце

Fig. 3. Scanning electron microscopy of the IRP 1338 sample with KFTO (60%): a) location of the discharge channel; b) point spectrum on the sample



То есть модификаторы в виде порошка представлены не отдельными частицами, равномерно распределенными в силиконе, а образуют множество скоплений (рис. 4). Данные агломераты могли возникнуть в результате выбранного метода механического смешивания, при котором не обеспечивается равномерное распределение и существуют условия для их образования.

Рис. 4. Образование агломератов порошка модификатора в силиконе

Fig. 4. Formation of powder modifier clusters in silicone

Заключение

На основании полученных нами результатов можно сделать вывод, что значительное повышение диэлектрической проницаемости силикона достижимо с применением легкодоступных и нетоксичных модификаторов для дальнейшего применения в электродной системе электроразрядных технологий. В результате проведенных экспериментов достигнуто повышение диэлектрической проницаемости изоляционного материала до 23,8 при частоте 1 МГц, что, в свою очередь, приведет к увеличению его срока службы, снижению энергетических потерь и повышению производительности электроразрядных технологий.

Максимально допустимая доля модифицирующего порошка без дополнительной обработки достигла 69,2 % от общей массы, превышение этого значения привело к снижению вязкости и разрушению образца. После обработки порошка BaTiO_3 стеариновой кислотой максимальная доля увеличилась до 76,5 %.

Из перечисленных выше модификаций выявлены образцы № 6, 8, которые отличаются наиболее привлекательными характеристиками для нашей цели. В связи с этим указанные образцы будут выбраны для более глубокого анализа и дальнейшего изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев А.А. Разрушение горных пород электрическими импульсными разрядами. – Томск: Изд-во ТГУ, 1961. – 150 с.
2. Чепиков А.Т. Исследование разрушения горных пород импульсными электрическими разрядами: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1961. – 206 с.
3. High-voltage pulsed generator for dynamic fragmentation of rocks / B.M. Kovalchuk, A.V. Kharlov, V.A. Vizir, V.V. Kumpyak, V.B. Zorin, V.N. Kiselev // *Rev. Sci. Instrum.* – 2010. – Vol. 81. – P. 103506.
4. Breakdown and destruction of heterogeneous solid dielectrics by high voltage pulses / I.V. Lisitsyn, H. Inoue, I. Nishizawa, S. Katsuki, H. Akiyama // *J. Appl. Phys.* – 1998. – Vol. 84. – P. 6262.
5. Timoshkin V.I., Mackersie J.W., MacGregor S.J. Plasma channel miniature hole drilling technology // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2004. – Vol. 32. – P. 2055.
6. Блазин Б.С., Щеголев И.А., Лозин Л.И. Обработка природного камня электрическими разрядами // *Электронная обработка материалов.* – 1983. – № 1 (109). – С. 5–7.
7. Плотников И., Александров Д. Разрушение бетона и железобетона при разрушении промышленных предприятий // *Строительство металлургических и химических предприятий.* – М.: ЦБНТИ, 1981. – Сер. 1. – Вып. 1. – С. 6–8.
8. Еремин В.Я. Разрядно-импульсные технологии на стройках России // *Стройклуб.* – 2002. – № 1–2 (9–10). – С. 11–15.
9. An all-organic composite actuator material with a high dielectric constant / Q.M. Zhang, H. Li, M. Poh, F. Xia, Z.-Y. Cheng, H. Xu, C. Huang // *Nature.* – 2002. – Vol. 419. – P. 284–287.
10. Carpi F., Rossi D.D., Improvement of electromechanical actuating performances of a silicone dielectric elastomer by dispersion of titanium dioxide powder // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.* – 2005. – Vol. 12. – P. 835–843.
11. Dielectric constant enhancement in a silicone elastomer filled with lead magnesium niobate–lead titanate / G. Gallone, F. Carpi, D.D. Rossi, G. Levita, A. Marchetti // *Materials Science and Engineering C.* – 2015. – Vol. 27. – P. 110–116.
12. Dielectric elastomers, with very high dielectric permittivity, based on silicone and ionic interpenetrating networks / Yu. Liyun, B.M. Frederikke, H. Søren, L.S. Anne // *RSC Advances.* – 2015. – Vol. 5. – P. 49739–49747.
13. Развитие полимерных композитных материалов с диэлектрическими свойствами для применения в технологиях накопления электрической энергии / В.В. Ховайло, И.В. Черунова, Е.А. Щеникова, И.В. Куренова, А.В. Меркулова, С.В. Князева, Е.Б. Стефанова, М.П. Стенькина // *Современные проблемы науки и образования.* – М.: Академия естествознания, 2013. – № 6. – 44 с.
14. High-voltage insulation and dielectric properties of ceramic-glass composites / M.Y. Hsieh, W.S. Chen, C.H. Hsu, C.H. Wu // *Journal of Asian Ceramic Societies.* – 2022. – Vol. 10. – P. 739–743.
15. Vu-Cong T., Jean-Mistral C., Sylvestre A. Impact of the nature of the compliant electrodes on the dielectric constant of acrylic and silicone electroactive polymers // *Smart Mater. Struct.* – 2012. – Vol. 21. – P. 105036.
16. Characterization of mechanical and dielectric properties of silicone rubber / E. Cho, L.L.Y. Chiu, M. Lee, D. Naila, S. Sadanand, S.D. Waldman, D. Sussman // *Polymers.* – 2021. – Vol. 13. – P. 1831.
17. Synergistic effect of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramic and $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene nanoflakes on the dielectric properties of poly (vinylidene fluoride) composites / A. Tsyganov, M. Vikulova, I. Zotov, I. Burmistrov, A. Gorokhovskiy, N. Gorshkov // *Materials Chemistry and Physics.* – 2024. – Vol. 313. – P. 128714.
18. Диэлектрический эластомерный композиционный материал, способ его получения и применения: пат. Рос. Федерации № 2713223; заявл. 29.11.2018; опубл. 04.02.2020, Бюл. № 4.
19. Enhancement of dielectric constant of polyimide by doping with modified silicon dioxide titanium carbide nanoparticles / T. Zhang, B.J. Han, J. Yu, H.D. Wang // *RSC Advances.* – 2018. – Vol. 8. – P. 16696–16702.
20. Synthesis and dielectric relaxation studies of $\text{KxFeyTi}_{8-y}\text{O}_{16}$ ($x=1.4\text{--}1.8$ and $y=1.4\text{--}1.6$) ceramics with hollandite structure / A. Tsyganov, D. Artyukhov, M. Vikulova, N. Morozova, I. Zotov, S. Brudnik, A. Asmolova, D. Zhelezov, A. Gorokhovskiy, N. Gorshkov // *Ceramics.* – 2023. – Vol. 6. – P. 619–629.

Информация об авторах

Евгений Юрьевич Радзивилов, аспирант, Инженерная школа новых производственных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; evgeniy_25_11_1997@mail.ru

Юдин Артем Сергеевич, кандидат технических наук, научный сотрудник, Инженерная школа новых производственных технологий, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; wm5@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4799-3375>

Поступила в редакцию: 24.03.2025

Поступила после рецензирования: 01.07.2025

Принята к публикации: 14.07.2025

REFERENCES

1. Vorobyov A.A. *Destruction of rocks by electric pulse discharges*. Tomsk, TSU Publ. house, 1961. 150 p. (In Russ.)
2. Chepikov A.T. *Study of rock destruction by pulse electric discharges*. Cand. Diss. Tomsk, 1961. 206 p. (In Russ.)
3. Kovalchuk B.M., Kharlov A.V., Vizir V.A., Kumpyak V.V., Zorin V.B., Kiselev V.N. High-voltage pulsed generator for dynamic fragmentation of rocks. *Rev. Sci. Instrum.*, 2010, vol. 81, pp. 103506.
4. 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, vol. 84, 6262 p.
5. Timoshkin V.I., Mackersie J.W., MacGregor S.J. Plasma channel miniature hole drilling technology. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2004, vol. 32, 2055 p.
6. Blazin B.S., Shchegolev I.A., Lozin L.I. Processing of natural stone by electric discharges. *Electron. Mater. Process*, 1983, no. 1 (109), pp. 5–7. (In Russ.)
7. Plotnikov I., Aleksandrov D. Destruction of concrete and reinforced concrete during demolition of industrial facilities. *Construction of Metallurgical and Chemical Plants*, Moscow, CBNTI Publ., 1981. Ser. 1, Iss. 1, pp. 6–8. (In Russ.)
8. Eremin V.Ya. Discharge-impulse technologies in Russian construction. *Construction Club*, 2002, no. 1–2 (9–10), pp. 11–15. (In Russ.)
9. Zhang Q.M., Li H., Poh M., Xia F., Cheng Z.-Y., Xu H., Huang C. An all-organic composite actuator material with a high dielectric constant. *Nature*, 2002, vol. 419, pp. 284–287.
10. Carpi F., Rossi D.D. Improvement of electromechanical actuating performances of a silicone dielectric elastomer by dispersion of titanium dioxide powder. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2005, vol. 12, pp. 835–843.
11. Gallone G., Carpi F., Rossi D.D., Levita G., Marchetti A. Dielectric constant enhancement in a silicone elastomer filled with lead magnesium niobate–lead titanate. *Mater. Sci. Eng. C*, 2015, vol. 27, pp. 110–116.
12. Liyun Yu, Frederikke B.M., Søren H., Anne L.S. Dielectric elastomers with very high dielectric permittivity, based on silicone and ionic interpenetrating networks. *RSC Adv.*, 2015, vol. 5, pp. 49739–49747.
13. Khovaylo V.V., Cherunova I.V., Shchenikova E.A., Kurenova I.V., Merkulova A.V., Knyazeva S.V., Stefanova E.B., Sten'kina M.P. Development of polymer composite materials with dielectric properties for electrical energy storage technologies. *Modern Problems of Science and Education*. Moscow, Academia of Natural Sciences Publ., 2013. No. 6, 44 p. (In Russ.)
14. Hsieh M.Y., Chen W.S., Hsu C.H., Wu C.H. High-voltage insulation and dielectric properties of ceramic-glass composites. *J. Asian Ceram. Soc.*, 2022, vol. 10, pp. 739–743.
15. Vu-Cong T., Jean-Mistral C., Sylvestre A. Impact of the nature of the compliant electrodes on the dielectric constant of acrylic and silicone electroactive polymers. *Smart Mater. Struct.*, 2012, vol. 21, 105036 p.
16. Cho E., Chiu L.L.Y., Lee M., Naila D., Sadanand S., Waldman S.D., Sussman D. Characterization of mechanical and dielectric properties of silicone rubber. *Polymers*, 2021, vol. 13, 1831 p.
17. Tsyganov A., Vikulova M., Zotov I., Burmistrov I., Gorokhovskiy A., Gorshkov N. Synergistic effect of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ceramic and $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene nanoflakes on the dielectric properties of poly(vinylidene fluoride) composites. *Mater. Chem. Phys.*, 2024, vol. 313, 128714 p.
18. *Dielectric elastomeric composite material, method of its production and application*. Patent RF no. 2713223, 2020. (In Russ.)
19. Zhang T., Han B.J., Yu J., Wang H.D. Enhancement of dielectric constant of polyimide by doping with modified silicon dioxide titanium carbide nanoparticles. *RSC Adv.*, 2018, vol. 8, pp. 16696–16702.
20. Tsyganov A., Artyukhov D., Vikulova M., Morozova N., Zotov I., Brudnik S., Asmolova A., Zheleznov D., Gorokhovskiy A., Gorshkov N. Synthesis and dielectric relaxation studies of $\text{K}_x\text{Fe}_y\text{Ti}_{8-y}\text{O}_{16}$ ($x=1.4\text{--}1.8$ and $y=1.4\text{--}1.6$) ceramics with hollandite structure. *Ceramics*, 2023, vol. 6, pp. 619–629.

Information about the authors

Evgeniy Yu. Radzivilov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; evgeniy_25_11_1997@mail.ru

Artem S. Yudin, Cand. Sc., Research Scientist, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; wm5@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4799-3375>

Received: 24.03.2025

Revised: 01.07.2025

Accepted: 14.07.2025