

Разработка изоляционного материала с заданной диэлектрической проницаемостью

*Е.Ю. Радзивилов**, *А.С. Юдин*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

**evgeniy_25_11_1997@mail.ru*

Аннотация. Предложены и проведены исследования по модификации силикона марки М750, с целью увеличения до заданных значений диэлектрической проницаемости. Данная изоляция предназначена для использования в электродной системе электроразрядных технологий. В результате проведенных экспериментов достигнуто повышение диэлектрической проницаемости до 35.81.

Ключевые слова: электроразрядные технологии, диэлектрическая проницаемость изоляции, электроимпульсный способ, высоковольтная изоляция.

1. Введение

Современные механические способы обработки и переработки горных пород, такие как бурение, дробление, резание практически исчерпали потенциал увеличения производительности и надежности, а также времени жизни рабочего инструмента. С переходом горных работ на большие глубины, заметно увеличиваются прочностные характеристики природной среды, а проблема ее разрушения становится еще более актуальной.

Анализ публикаций показывает высокую эффективность и интерес применения электроразрядных технологий для разрушения крепких горных пород, которые были открыты в Томском политехническом университете (Россия) [1–3].

При воздействии импульса высокого напряжения микросекундной длительности на горную породу в электроизоляционной жидкости (в том числе и в воде) происходит внедрение канала разряда в породу. Это явление – основа электроимпульсного (ЭИ) способа разрушения твердых тел. В самой сущности ЭИ способа заложена возможность достижения более высокой в сравнении с механическими способами эффективности разрушения с низкими энергетическими затратами [4].

Электроразрядные технологии нашли широкое применение в технологиях очистки и обеззараживания воды [5], угнетения радиации, ремонта судов [6], борьбы с оползнями [7], в медицине для дробления почечных камней [8], в сельском хозяйстве для подготовки зерна и удобрений [9, 10] и во многих других отраслях.

В настоящее время разными исследователями в мире ведется всестороннее развитие электроимпульсного способа, в том числе разрабатываются экспериментальные технологические электроимпульсные установки для бурения и дробления [11–13].

Появление электроразрядных технологий привело к появлению новых требований к изоляции для длительной работы при импульсном напряжении. Одной из главных проблем широкого внедрения электроразрядных технологий является изоляция. Для решения данной проблемы предлагается модифицировать изоляцию, получив при этом заданное значение диэлектрической проницаемости, что в свою очередь приведет к увеличению срока её службы, сокращению потерь энергии, увеличению производительности.

При появлении изоляционного материала, способного длительно работать в качестве высоковольтной изоляции электродов в воде может дать значительный импульс к развитию электроразрядных технологий бурения, дробления, резания, снятия поверхностного слоя.

На данный момент проблема с изоляцией не решена и остается актуальной.

Поскольку трудно получить мягкие материалы с высокими диэлектрическими проницаемостями, жизнеспособная стратегия может заключаться в приготовлении композитов на основе специализированных материалов, таких как мягкие эластомеры, полимеры или электрокерамика. Этот подход «улучшения диэлектрической проницаемости» был принят Чжаном и др. [14]. Чтобы увеличить диэлектрическую проницаемость сополимера, Чжан и др. предложили добавлять специальные компоненты с высокой диэлектрической проницаемостью, такие как фталоцианин меди [14]. 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 [15].

2. Методика

В данной работе было предложено несколько вариантов модификации силикона марки М750, который состоит из двух основных компонентов (А и В): титанатом бария (BaTiO_3), глицерином, этиленгликолем и их комбинации. При выборе модификатора учитывались критерии их легкой доступности на рынке, удобства в процессе применения, а также их высокие значения диэлектрической проницаемости, которые составляют:

- BaTiO_3 – 1400 ± 250 при н.у.;
- глицерин – 56 при н.у.;
- этиленгликоль – 39 при н.у.

В данной работе измерение емкости (C) производилось на трех частотах (1 кГц, 100 кГц, 1 МГц) при комнатной температуре, прибором «Измеритель иммитанса Е7-20», это прецизионный прибор класса точности 0.1 с диапазоном измерений от 0.001 пФ до 1 Ф и высокой скоростью измерений до 25 измерений/сек.

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

Затем рассчитывалась диэлектрическая проницаемость из формулы емкости плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} \Rightarrow \varepsilon = \frac{Cd}{\varepsilon_0 S}, \quad (1)$$

где C – емкость; ε – диэлектрическая проницаемость; ε_0 – электрическая постоянная ($8.854 \cdot 10^{-12}$ 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, заполненную маслом, с электродами, расположенными на фиксированном расстоянии друг от друга. Для устранения поверхностных разрядов, возникающих при испытании образцов на воздухе, данные образцы были полностью погружены в масло.

Затем можно рассчитать электрическую прочность материала:

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{d}, \quad (2)$$

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

2.1. Титанат бария

Изначально модификация силикона марки М750 происходила при механическом смешивании данного силикона с порошком титаната бария при комнатной температуре, стараясь не допустить появления пузырьков воздуха. Доля введенного титаната бария составила 10% и 50% от общего объема, при равном количестве компонентов А и В (Таблица 1, обр. № 2 и 3).

2.2. Этиленгликоль

Модификация силикона этиленгликолем происходила следующим образом, сначала в компонент А был добавлен этиленгликоль, механическое смешивание производилось при комнатной температуре, стараясь не допустить появления пузырьков воздуха, при этом смесь получилась гетерогенной (этиленгликоль с компонентом А не смешались), затем был добавлен компонент В и произведено повторное размешивание, после чего смесь стала гомогенной. Доля введенного этиленгликоля составила 25% от общего объема, при равном количестве компонентов А и В (Таблица 1, обр. № 4).

2.3. Глицерин

Изначально модификация силикона глицерином происходила следующим образом, сначала в компонент А был добавлен глицерин, механическое смешивание производилось при комнатной температуре, стараясь не допустить появления пузырьков воздуха, затем был добавлен компонент В и произведено повторное размешивание. Доля введенного глицерина составила 16,7, 25 и 33,3% от общего объема. Соотношение компонента А к глицерину составило 2:1, 1:1 и 1:2. При объеме заготовленной формы 9 мл., доля компонента А составила: 3 мл.; 2,25 мл.; 1,5 мл., глицерина: 1,5 мл.; 2,25 мл.; 3 мл., компонента В по 4,5 мл. (таблица 1, обр. № 5, 7 и 9). Далее смешивание глицерина происходило с компонентом В, с последующим добавлением компонента А в аналогичных пропорциях (Таблица 1, обр. № 6, 8 и 10).

Затем модификация силикона глицерином происходила таким же образом. Доля введенного глицерина составила 25% и 33,3% от общего объема, при равном количестве компонентов А и В (Таблица 1, обр. № 11 и 12).

Далее модификация силикона глицерином происходила следующим образом, после смешивания глицерина с компонентами А и В (аналогично обр. № 5 и 6), смесь помещалась в вакуумную камеру и происходил процесс вакуумирования, после этого смесь переливалась в заготовленную форму и вакуумировалась повторно (Таблица 1, обр. № 16 и 17).

2.4. Глицерин и титанат бария

Модификация силикона глицерином и порошком титаната бария происходила следующим образом, сначала в компонент А был добавлен глицерин и порошок титаната бария, механическое смешивание производилось при комнатной температуре, стараясь не допустить появления пузырьков воздуха, затем был добавлен компонент В и произведено повторное размешивание. Доля введенного глицерина и порошка титаната бария составила по 25% от общего объема, при равном количестве компонентов А и В. Соответственно при объеме заготовленной формы 9 мл., доля каждого компонента составила 3 мл. (Таблица 1, обр. № 13). При изготовлении обр. № 14 доля введенного глицерина и порошка титаната бария составила по 33,3% от общего объема, при равном количестве компонентов А и В.

Далее модификация силикона глицерином и порошком титаната бария происходила следующим образом, после смешивания глицерина и порошка титаната бария с компонентами А и В (аналогично обр. № 13 и 14), смесь помещалась в вакуумную камеру и

происходил процесс вакуумирования, после этого смесь переливалась в заготовленную форму и вакуумировалась повторно (Таблица 1, обр. № 22–24). При изготовлении обр. № 25 доля введенного глицерина и порошка титаната бария составила по 33.3% от общего объема, при равном количестве компонентов А и В.

Таблица 1. Результаты эксперимента.

| Образец № | Толщина (мм) | Емкость (пФ) (100 кГц) | Диэлектрическая проницаемость (ϵ) | Эл. прочность $E_{пр}$ (кВ/мм) |
|---|--------------|------------------------|--|--------------------------------|
| 1 M750 чистый | 4.1 | 15 | 3.84 | 12.93 |
| 2 M750 с ВаTiO ₃ (10%) (A=B) | 5.4 | 12.8 | 4.32 | 16.85 |
| 3 M750 с ВаTiO ₃ (50%) (A=B) | 4.5 | 23 | 6.46 | 20 |
| 4 M750 с этиленгликолем (25%) | 3 | 36.4 | 6.82 | 6.7 |
| 5 M750 с глицерином (16.7%) А | 4.3 | 19.3 | 5.18 | 20.9 |
| 6 M750 с глицерином (16.7%) В | 4 | 21.2 | 5.3 | 12 |
| 7 M750 с глицерином (25%) А | 4.2 | 21.4 | 5.61 | 7.6 |
| 8 M750 с глицерином (25%) В | 4 | 24.4 | 6.09 | 7.5 |
| 9 M750 с глицерином (33.3%) А | 4.2 | 31.4 | 8.24 | 5.2 |
| 10 M750 с глицерином (33.3%) В | 2.7 | 47.3 | 7.97 | 6.7 |
| 11 M750 с глицерином (25%) (A=B) | 4 | 20.6 | 5.15 | 10.8 |
| 12 M750 с глицерином (33.3%) (A=B) | 3.6 | 28.9 | 6.5 | 7.8 |
| 13 M750 с глицерином и ВаTiO ₃ (по 25%) (A=B) | 3 | 50.8 | 9.52 | 3.7 |
| 14 M750 с глицерином и ВаTiO ₃ (по 33.3%) (A=B) | 2 | 110.3 | 13.77 | 4.5 |
| Отвакуумированный материал | | | | |
| 15 M750 с глицерином (16.7%) В | 3.5 | 23.4 | 5.11 | 14.3 |
| 16 M750 с глицерином (25%) А | 3 | 26.8 | 5.02 | 6.7 |
| 17 M750 с глицерином (25%) В | 3 | 32.4 | 6.07 | 15 |
| 18 M750 с глицерином (33.3%) В | 2.7 | 37.4 | 6.31 | 8.2 |
| 19 M750 с глицерином (25%) (A=B) | 3.5 | 28.4 | 6.21 | 12 |
| 20 M750 с глицерином (33.3%) (A=B) | 3.5 | 34.4 | 7.52 | 11.4 |
| 21 M750 с глицерином (50%) (A=B) | 2.5 | 50.3 | 7.85 | 3.6 |
| 22 M750 с глицерином (12.5%) и ВаTiO ₃ (12.5%) (A=B) | 3.5 | 29.8 | 6.51 | 13.7 |
| 23 M750 с глицерином (16.5%) и ВаTiO ₃ (16.5%) (A=B) | 3.5 | 31.3 | 6.84 | 12.9 |
| 24 M750 с глицерином и ВаTiO ₃ (по 25%) (A=B) | 3.5 | 46.4 | 10.14 | 9.43 |
| 25 M750 с глицерином и ВаTiO ₃ (по 33.3%) (A=B) | 2.5 | 229.4 | 35.81 | 3.6 |

Затем все образцы отверждали при комнатной температуре в течении 48 ч., с дальнейшим испытанием на электрическую прочность и диэлектрическую проницаемость. Результаты эксперимента представлены в Таблице 1.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Испытания чистого силикона марки М750 показали хорошие значения электрической прочности при малых значениях диэлектрической проницаемости, для длительного использования в качестве изоляции в электродной системе электроразрядных технологий (см. Таблицу 1).

После изготовления и испытания образца № 4, спустя месяц было отмечено уменьшение его в диаметре, в результате чего было проведено повторное измерение емкости с целью вычисления диэлектрической проницаемости. Диэлектрическая проницаемость снизилась на 2.14, что указывает на испарение этиленгликоля. Исходя из этого, было прекращено дальнейшее использование этиленгликоля в качестве модифицирующей добавки.

При изготовлении образца № 16 смесь оказалась высоковязкой, что привело к невозможности заполнения пор без появления пузырьков воздуха. Исходя из этого было принято решение смешивать глицерин с компонентом В с дальнейшим добавлением компонента А (Таблица 1, обр. № 15 и 18).

При изготовлении образца № 21 произошло образование гетерогенной смеси, где глицерин не был равномерно распределен, что привело к образованию включений из большого количества глицерина, не взаимодействующих с компонентами А и В.

При изготовлении обр. № 14 смесь получилась гетерогенной (глицерин и порошок BaTiO_3 не размешались в полном объеме).

При изготовлении обр. № 25 смесь получилась гетерогенной (глицерин и порошок BaTiO_3 не размешались в полном объеме), материал получился мягким и не эластичным.

Стоит отметить, что повышение содержания модифицирующей добавки (BaTiO_3) привело к увеличению диэлектрической проницаемости. Каждые 10% BaTiO_3 , добавленные к чистому силикону марки М750, увеличивают диэлектрическую проницаемость образца примерно на 0.5, с параллельным ростом электрической прочности. В то же время увеличение содержания другой модифицирующей добавки (глицерина) также увеличивает диэлектрическую проницаемость, но снижает электрическую прочность. При одновременном добавлении обоих компонентов (BaTiO_3 и глицерина) к силикону, диэлектрическая проницаемость увеличивается значительно быстрее, но электрическая прочность заметно уменьшается.

4. 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 технологиях. В результате проведенных экспериментов достигнуто повышение диэлектрической проницаемости до 35.81.

Образцы № 14, 18, 21 и 25 с высоким содержанием глицерина не пригодны для использования в качестве изоляции в электродной системе электроразрядных технологий из-за своей мягкой структуры.

Из перечисленных выше модификаций, выявлены образцы № 9, 10, 13, 20 и 24, которые отличаются наиболее привлекательными характеристиками для нашей цели. В связи с этим, указанные образцы будут выбраны для более глубокого анализа и дальнейшего изучения.

5. Список литературы

- [1] V.Ya. Ushakov, V.F. Vazhov, N.T. Zinoviev, *Electro-Discharge Technology for Drilling Wells and Concrete Destruction*, Basel: Springer Nature Switzerland AG, 2019.
- [2] E. Anders, M. Voigt, F. Lehmann, Electric Impulse Drilling: the future of drilling technology begins now, *ASME, 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Trondheim, Norway, 2017; doi: 10.1115/OMAЕ2017-61105
- [3] D. Molchanov, V. Vazhov, I. Lavrinovich, V. Lavrinovich, N. Ratakhin, Downhole generator based on a line pulse transformer for electro pulse drilling, *21st International Conference on Pulsed Power (PPC)*, Tomsk, Russia, 2017; doi: 10.1109/PPC.2017.8291167
- [4] Б.В. Сёмкин, А.Ф. Усов, В.И. Курец, *Основы электроимпульсного разрушения материалов*, СПб.: Наука, 1995.
- [5] Е.Г. Жук, Бактерицидные факторы импульсного электрического разряда при обеззараживании воды, *Электрон. обраб. Материалов*, № 4, 1978.
- [6] Е.Н. Перевязкина, Н.Д. Рязанов, Природа обеззараживающего действия импульсного электрического разряда в воде, *Тез. Всес. науч. совещания*, Томск, 1982.
- [7] Б.М. Рогачевский, С.Ю. Макеев, В.И. Емельяненко, С.И. Зигало, Способ борьбы с оползнями, *Патент Украины № 37412А*, МПК: E02D 27/26, заявл. 29.09.1998; опубл. 15.05.2001, Бюл. № 4 (ч. II).
- [8] Методы удаления почечных камней, *БИНТИ ТАСС*, № 15, 1984.
- [9] В.Н. Писаревский, В.Н. Пономаренко, А.А. Залевский, Электроимпульсное стимулирование семян кукурузы, *Электрон. обраб. материалов*, № 4, 1985.
- [10] Л.А. Юткин, Л.И. Гольцова, Способ электрогидравлического получения удобрений, *СССР, Открытия. Изобретения*, 1983.
- [11] M. Voigt, E. Anders, F. Lehmann, S. Grobmann, With Electric Pulses to Geothermal Heat, *Proc. Symp. of Energie Innovation*, Austria, 2018; doi: 10.3217/978-3-85125-586-7
- [12] H.O. Schiegg, A. Rodland, G. Zhu, A. David, Electro-pulse-boring (EPB): Novel super-deep drilling technology for low cost electricity, *Journal of Earth Science*, 2015, doi: 10.1007/s12583-015-0519-x
- [13] H. Bluhm, W. Frey, H. Giese, P. Hoppe, C. Schultheiß, Strässner R., Application of pulsed HV discharges to material fragmentation and recycling, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2000; doi: 10.1109/94.879358
- [14] Q.M. Zhang, H. Li, M. Poh, F. Xia, Z.-Y. Cheng, H. Xu, C. Huang, An all-organic composite actuator material with a high dielectric constant, *Nature*, Pennsylvania, USA, 2002; doi: 10.1038/nature01021
- [15] 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; doi: 10.1109/TDEI.2005.1511110