

Измерение и моделирование частичных разрядов в твердых топливах

© С.М. Мартемьянов, А.А. Бухаркин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия
e-mail: martemyanov@tpu.ru

Поступило в Редакцию 22 ноября 2021 г.

В окончательной редакции 27 декабря 2021 г.

Принято к публикации 28 декабря 2021 г.

Проведено исследование характеристик частичных разрядов в твердых топливах. Появление частичных разрядов в твердых топливах наступает при весьма низких напряжениях, не характерных для большинства диэлектриков. Активность этих частичных разрядов ведет к наступлению пробоя породы. Приведенные в работе характеристики частичных разрядов в горючих сланцах месторождения Хуадань (Китай) указывают на величину напряжения, при которой возникают частичные разряды и происходит пробой, а также показывают характер зависимости характеристик от напряжения. Предпринята попытка объяснить низкую величину напряжения возникновения частичных разрядов в твердых топливах, а также обосновать возможность применения характеристик частичных разрядов для прогнозирования наступления пробоя межэлектродного расстояния для применения в технологии внутрипластового нагрева и пиролиза твердых топлив.

Ключевые слова: горючие сланцы, подземная конверсия, моделирование распределения поля, измерение кажущегося заряда.

DOI: 10.21883/JTF.2022.04.52252.296-21

Введение

Месторождения низкосортных твердых топлив, таких как горючие сланцы, широко распространены. До конца прошлого века эти запасы рассматривались в качестве важного топливно-энергетического и химико-технологического сырья [1]. Однако эти ресурсы не выдерживают конкуренции с нефтью и природным газом, разработка которых требует существенно меньших издержек. Для освоения низкосортных твердых топлив необходима рентабельная, экологически безопасная и относительно универсальная технология разработки подобных месторождений.

Подземные способы разработки позволяют исключить затраты на извлечение породы, строительство реторт и утилизацию золы, которая может достигать 90% состава горючих сланцев. Существует множество предложенных решений, в том числе на основе опробованных в промышленности технологий [2]. Наиболее многообещающим является подземный ретортинг, суть которого в том, чтобы нагреть подземный пласт до температуры пиролизического разложения [3]. В результате образуется смесь газообразных и жидких продуктов, которые могут применяться как сырье для химического или энергетического использования.

Техническая проблема нагрева подземного пласта состоит в низкой теплопроводности горючих сланцев. В итоге локальное нагревание требует длительного времени на нагрев. Например, процесс Shell ICP [4], который использует электрические нагреватели в скважинах, требует от нескольких месяцев до двух лет для

прогрева участка месторождения до того, как начнется отбор продуктов конверсии [5]. Таким образом, целесообразно, чтобы источник нагрева был распределен внутри пласта. Исследуемый нами способ заключается в создании канала электротеплового пробоя в пласте между электродами, расположенными в скважинах. Далее канал пробоя используется в качестве резистивного нагревательного элемента для нагрева [6,7]. При этом экономически целесообразно, чтобы расстояние между скважинами было как можно больше. Однако с технической точки зрения электрический пробой большого расстояния может потребовать нереализуемо высокого напряжения.

Здесь может быть использован эффект, который в изоляционной технике называют деградацией. Этот эффект состоит в постепенном снижении сопротивления материала под действием высокого напряжения. Основными факторами деградации являются частичные разряды (ЧР), происходящие при напряжении в десятки киловольт на миллиметр на промышленной частоте [8,9]. К частичным разрядам относятся локальные пробои микровключений, главным образом газообразных и жидких [10]. Активное действие ЧР вызывает рост древовидных разрядных структур, называемых дендритами [11]. Появление таких структур и ведет к деградации материала.

В результате исследования поведения горючих сланцев под действием высокого напряжения нашей группой было обнаружено, что в горючих сланцах ряда месторождений ЧР и электрическая деградация наступают при значительно более низком напряжении [12] по

сравнению с изоляционными материалами [13,14]. Например, для горючих сланцев месторождения Хуадань (Китай) напряжение величиной 3–4 кВ, приложенное к межэлектродному расстоянию 10 см, вызывает высокую активность ЧР и в итоге приводит к образованию низкоомного канала пробоя между электродами. Для того чтобы определить какое напряжение нужно для электротеплового пробоя при больших межэлектродных расстояниях и для разных месторождений, нужно понимать механизм возникновения ЧР и роста дендритов в горючих сланцах.

В настоящей работе описано измерение ЧР в твердых ископаемых топливах на примере горючих сланцев месторождения Хуадань (Китай). Целью работы является попытка смоделировать процессы начала и развития ЧР в твердых топливах. Это поможет объяснить причину низкого напряжения возникновения ЧР в твердых топливах, а также понять закономерности развития триинга в этом виде материалов.

1. Методика эксперимента

ЧР характеризуют с помощью нескольких параметров. Наиболее важными из них являются кажущийся заряд, частота следования и распределение концентрации разрядов по периоду (фазовая диаграмма). Для обнаружения ЧР используются электрические и неэлектрические методы, но наибольшую точность измерения характеристик обеспечивают электрические [15]. Для наших измерений и использовали схему регистрации тока через образец, поскольку она обеспечивает наилучшую чувствительность [16]. Схема измерительной установки приведена на рис. 1.

С помощью индукционного регулятора TV_1 и повышающего трансформатора TV_2 к образцу прикладывается высокое напряжение промышленной частоты, величину которого можно регулировать. Элемент Z_f называется блокирующим импедансом и препятствует проникновению помех из сети электропитания в измерительную цепь. Элемент, который использовался в качестве блокирующего импеданса, представляет собой проволочный резистор трубчатой конструкции с сопротивлением 1 к Ω со вставленным вовнутрь ферритовым сердечником для увеличения индуктивности. Результирующая индуктивность составила 5.9 мН. Параллельно с цепью образца включен так называемый соединительный конденсатор

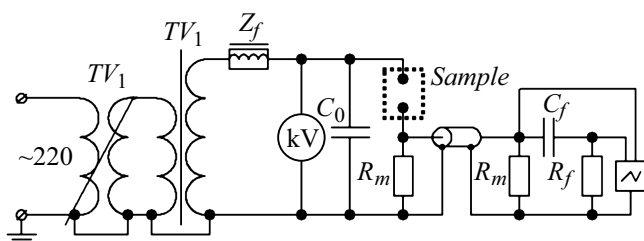


Рис. 1. Принципиальная схема измерительной установки.

C_0 емкостью 34 пФ, предназначенный для замыкания высокочастотного тока частичных разрядов. Измерение тока производится с помощью двух резисторов R_m , включенных параллельно и равных 150 Ω каждый. Измеряемый сигнал передается на регистрирующий прибор с помощью коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 150 Ω . Измерительные резисторы R_m одновременно выполняют функцию согласования измерительного тракта с цепью образца на одном конце и цепью измерительного прибора с другой стороны. Конструктивно R_m представляет собой чип-резисторы, смонтированные непосредственно в разъем измерительного кабеля. Сигнал, измеряемый на элементах R_m , представляет собой сумму тока образца и тока частичных разрядов. Выделение тока ЧР производится с помощью RC-фильтра с граничной частотой 945 Hz, реализованного на элементах R_f и C_f . Фильтр также выполнен на чип-элементах и имеет коаксиальную конструкцию. В качестве регистрирующего устройства использовался осциллограф Agilent Technologies DSOX 2014A. Проверка оборудования проводилась на эталонном образце из полиметилметакрилата. Тестовый эксперимент показал, что при напряжении до 5 кВ не наблюдаются высокочастотные импульсы. Этот эксперимент свидетельствует, что установка не является источником импульсов, которые можно было бы ошибочно принять за ЧР в образце.

Измерение характеристик ЧР производилось на образцах породы размерами 250×80×80 мм. В качестве электродов использовались стальные стержни диаметром 12 мм и длиной 200 мм, устанавливаемые в предварительно подготовленные глухие отверстия глубиной 50 мм на расстоянии друг от друга 200 мм. Для улучшения электрического контакта и исключения искажения данных вследствие приэлектродных явлений в качестве контактного материала использовался мелкодисперсный углерод.

Напряжение, прикладываемое к образцу, повышалось от 0 В на 0.25 кВ каждые 10 мин с фиксацией осциллограмм ЧР при каждом уровне напряжения до пробоя. Осциллографом регистрировались осциллограммы единичных импульсов и полного периода (20 мс) воздействующего напряжения и тока через образец. По полученным осциллограммам определялись значения кажущегося заряда и частоты следования. Значение кажущегося заряда определялось по импульсам, имеющих наибольшую величину тока, но повторяющихся не менее 10 раз в секунду. Расчет частоты следования производился по сумме всех импульсов за секунду, т.е. 50 периодов.

2. Результаты измерений

Мы провели измерения для пород нескольких месторождений России, Казахстана и Китая. Результаты получились аналогичные. Приведем в качестве примера

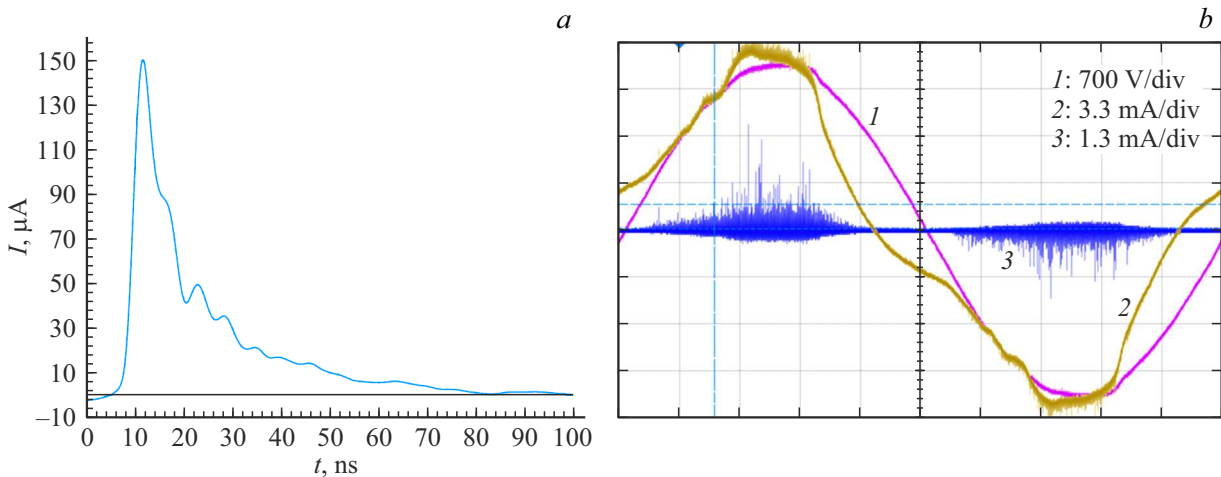


Рис. 2. Типичный импульс тока ЧР (a) и фазовая диаграмма (b): 1 — приложенное напряжение, 2 — ток через образец, 3 — высокочастотная составляющая тока через образец.

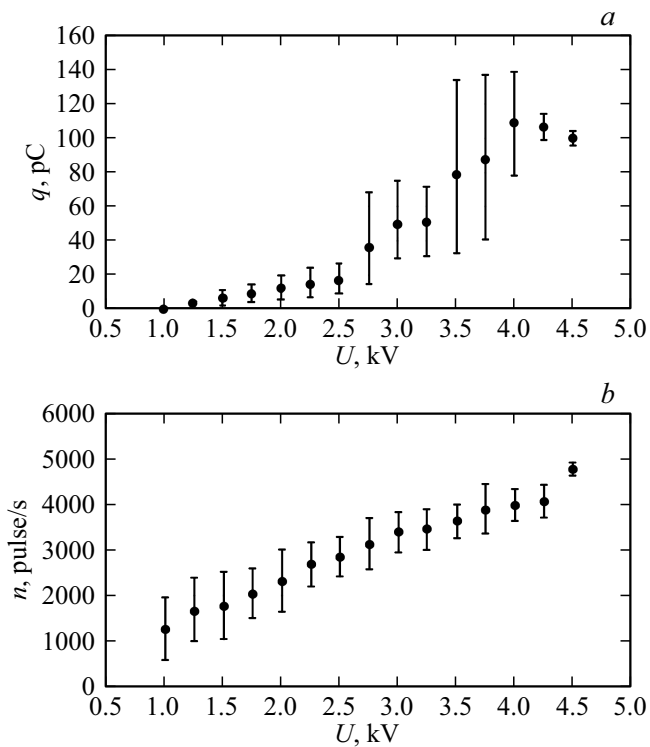


Рис. 3. Зависимость среднего значения кажущегося заряда (a) и частоты следования импульсов (b) от приложенного напряжения, измеренная для пяти образцов горючих сланцев.

данные, полученные на горючих сланцах Хуаданьского месторождения (Китай).

Типичный импульс тока частичного разряда имеет короткий фронт и экспоненциальный спад (рис. 2, a). Фазовая диаграмма (рис. 2, b) дает представление о распределении концентрации частичных разрядов по периоду приложенного напряжения. Многие исследования показывают, что с помощью значений кажущегося

заряда и фазовых диаграмм можно определять, какие разрядные процессы происходят в материале. Например, можно идентифицировать докритические ЧР, начало триинга, активное развитие триинга [17,18]. Однако для разработки таких методов диагностики нужно большое количество экспериментального материала.

У горючих сланцев месторождения Хуадань первые регистрируемые импульсы частичных разрядов появляются при напряжении чуть меньше 1 kV (рис. 3). При повышении напряжения возрастает как величина среднего кажущегося заряда, так и частота следования импульсов.

Разброс полученных значений сравнительно небольшой, если учитывать весьма высокую неоднородность состава породы. Полученные характеристики в целом похожи друг на друга. Следует отметить выраженную волнообразность характеристик, которая наблюдается для всех образцов и может свидетельствовать об изменении характера происходящих в образце разрядных процессов. Для всех образцов напряжения возникновения частичных разрядов составило менее 1 kV, а пробой наступил при напряжениях от 3.75 до 4.5 kV. Такие значения весьма малы и нетипичны для большинства диэлектриков. С учетом того что твердые топлива при низких напряжениях также относятся к диэлектрическим материалам, можно предположить, что и происходящие процессы электрической деградации качественно похожи на аналогичные процессы других диэлектриков. Однако столь низкое напряжение возникновения частичных разрядов невозможно в рамках представления о ЧР в диэлектриках. В изоляционных материалах источником ЧР являются включения малых размеров, которые искажают распределение электрического поля и образуют участки повышенной напряженности. При напряжении порядка 1 kV такое возможно только в случае, когда подобное включение полностью концентрирует на себе все приложенное напряжение. Мы попытались объяснить

это явление с помощью моделирования распределения поля в образце.

3. Моделирование распределения электрического поля в твердых топливах

Попытаемся объяснить низкую величину напряжения возникновения частичных разрядов и наступления пробоя в горючих сланцах. Горючие сланцы — это осадочная горная порода с весьма высокой неоднородностью, состоящая из органической и минеральной частей. Электрофизические свойства отдельных компонентов горючих сланцев варьируются в очень широком диапазоне [19,20]. Участки отдельных компонентов присутствуют, как правило, в виде прослоек или линз. Также в структуре породы присутствуют газовые поры. В результате отдельные прослойки или линзы, имеющие повышенное значение диэлектрической постоянной, могут служить концентраторами поля. На наш взгляд, решающее значение здесь вносит межфазная поляризация Максвелла–Вагнера. Известно, что в комплексных структурах поляризация Максвелла–Вагнера может приводить к эффективным значениям диэлектрической проницаемости в десятки и сотни тысяч [21–24]. Эта поляризация приводит к образованию носителей заряда на границе раздела поверхностей, в результате чего эффективное значение диэлектрической проницаемости значительно увеличивается, особенно на низкой частоте. Особенно это характерно для пород, минеральная часть которых представлена глинами, а не песчаниками, поскольку в этом случае межслоевые границы более гладкие. Это предположение косвенно подтверждается экспериментально тем, что в глинистых горючих сланцах электропробой на-

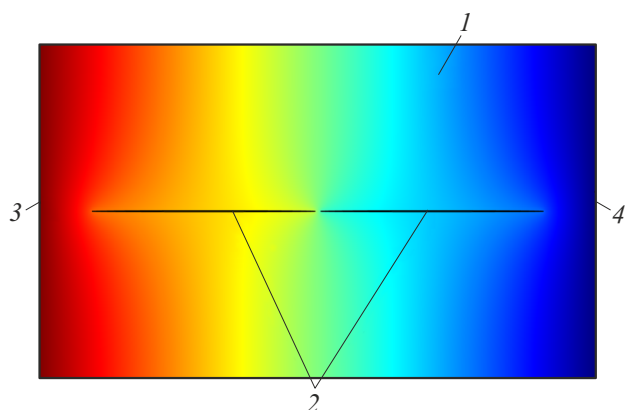


Рис. 4. Модель участков с высокой величиной диэлектрической проницаемости в глиняной среде: 1 — среда глины, 2 — два тонких эллипсовидных включения, 3, 4 — поверхности с заданным потенциалом. Градациями цвета показано распределение потенциала.

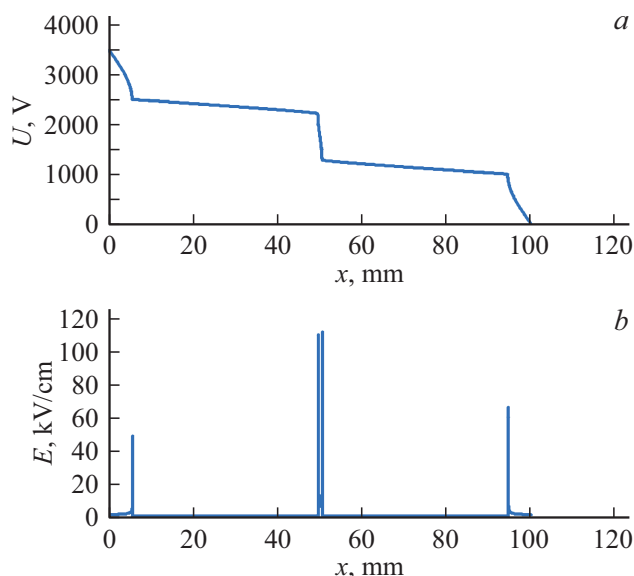


Рис. 5. Распределение потенциала (а) и напряженности (б) вдоль оси, проходящей через центры включений.

ступает при более низком напряжении, чем в песчаниковых.

Чередование слоев в горючих сланцах происходит непрерывно, и толщина каждого слоя составляет от единиц до сотен микрон. Рассмотрим в качестве примера упрощенный случай, где в глиняной среде располагаются два вытянутых эллипсовидных включения размерами 40 на 0,2 mm (рис. 4). Мы предполагаем, что практически в любом участке материала можно встретить похожую структуру.

К участку глины на расстоянии 100 mm приложено напряжение 3500 V. Два эллипсовидных включения внутри расположены на расстоянии 1 mm друг от друга. Диэлектрическая проницаемость глины задана равной 2, для включений — 1000. Предполагается, что такая эффективная проницаемость вполне возможна за счет перемещения носителей заряда вдоль поверхности включения за счет эффекта Максвелла–Вагнера. Для построения и расчета модели использован программный продукт Comsol Multiphysics. На рис. 5 показано распределение потенциала и напряженности вдоль оси, проходящей через центры включений.

Согласно рис. 5, а, к промежутку в 1 mm между включениями прикладывается напряжение около 1 kV. Этого достаточно для начала частичных разрядов в газовых микрополостях в этом зазоре. Локальная напряженность здесь 100 kV/cm (рис. 5, б), что даже выше, чем электрическая прочность глины [25]. Далее под действием плазмы частичных разрядов органическое вещество, присутствующее в составе горючих сланцев, будет подвергаться карбонизации. В результате будет происходить развитие электрического триинга электропроводного типа [26,27].

4. Обсуждение

При описании процессов переноса заряда при частичных разрядах часто используют емкостную схему замещения [28]. В основе этой модели лежит предположение, что частичный разряд возникает при пробое включения, и это включение можно представить в виде емкости C_c (рис. 6). В результате частичного разряда эта емкость разряжается, что создает импульс тока ЧР. Когда разряд погасает, емкость включения снова заряжается от межэлектродной емкости C_a через емкость между электродами и включением C_b .

В случае с полимерами не учитывается электропроводность материала, которая низка и ее влиянием можно пренебречь. Аналогичная модель для твердых топлив должна учитывать электропроводность среды, которая существенна по сравнению с полимерами. Однако с помощью емкостной модели нам не удалось получить точно такие же данные, как в эксперименте. Ряд исследований показывают, что емкостная модель является сильно упрощенной и не точно описывает процессы переноса заряда при возникновении ЧР [28].

В связи с этим мы решили предложить модель распределения поля, которая объясняет возможный характер электроразрядных явлений в твердых топливах. Предложенная модель объясняет весьма низкое значение напряжения возникновения ЧР и пробоя.

Активность частичных разрядов может приводить к электрическому пробое материала. Причем существует зависимость между характеристиками ЧР и стадией электрической деградации [29,30]. Таким образом, измеряя характеристики ЧР, можно прогнозировать момент наступления пробоя и величину напряжения, которая приведет к пробое. В [29] описаны стадии развития электрического тринга в эпоксидной смоле – зарождение, появление малых веток, объединение малых веток в канал. Каждой из этих стадий соответствуют определенные признаки активности ЧР. В работе [30] также отмечают зависимость электрической деградации от характеристик ЧР. Основные параметры, на которые авторы указанных

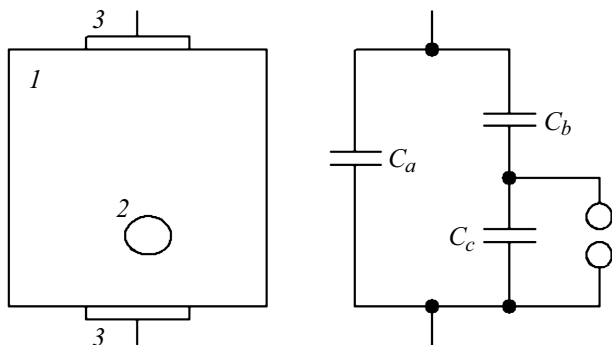


Рис. 6. Емкостная модель частичных разрядов: 1 — диэлектрический материал, 2 — включение, 3 — электроды, C_a — емкость между электродами, C_b — емкость между включением и электродами, C_c — емкость включения.

работ обращают внимание, это кажущийся заряд, частота следования и фазовое распределение импульсов ЧР по периоду приложенного напряжения.

В нашем случае также можно проследить определенные закономерности в поведении кривых зависимости кажущегося заряда и частоты следования от напряжения. Для всех исследованных образцов до напряжения 2.5 kV кажущийся заряд почти линейно возрастает. При дальнейшем повышении напряжения возникает резкое увеличение кажущегося заряда, которое снижается к напряжению 3.5 kV. Далее снова происходит повышение, ведущее к пробое при напряжении около 4.5 kV. Такое сходство в поведении кривых для разных образцов указывает на то, что происходящие в породе разрядные явления коррелируют с величиной приложенного напряжения. Таким образом, характеристики частичных разрядов могут быть использованы для диагностики разрядных явлений в твердых топливах и прогнозирования наступления пробоя. Этот эффект может быть использован при пробое участков подземных пластов твердых топлив в технологиях внутривластового пиролиза с целью подземной конверсии.

Заключение

ЧР в твердых топливах приводят к постепенной электрической деградации и пробое. По техническим характеристикам этот процесс аналогичен тому, как это происходит в полимерных диэлектриках, однако абсолютные величины напряжений гораздо ниже. Это связано с неоднородным составом и строением материала твердых топлив. Приведенные графики зависимости кажущегося заряда и интенсивности ЧР от напряжения показывают, что ЧР появляются при напряжении менее 1 kV, а пробое наступает при напряжении менее 5 kV. Приведенная модель распределения электрического поля по структуре образца имеет цель предположить причину радикально низкого значения напряжения возникновения ЧР и пробоя в твердых топливах.

Весьма низкое напряжение пробоя позволяет предположить, что в залегающем пласте можно создать канал пробоя протяженностью в десятки метров при технически реализуемых значениях напряжения. Такой эффект можно использовать для создания технологии подземного нагрева и пиролиза твердых топлив путем использования канала пробоя в качестве электронагревателя. Однако в полевых условиях крайне желательно иметь способ, с помощью которого можно диагностировать разрядные процессы в подземном пласте и сделать вывод, достаточно ли такого напряжения при таком расстоянии для создания канала пробоя. На наш взгляд, можно использовать корреляцию между частичными разрядами и электрическим трингом. Создание подобной методики требует получения экспериментальных зависимостей характеристик от напряжения и времени

на образцах с разным значением межэлектродного расстояния и желателно в условиях залегания пласта.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-00068)

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.R. Dyni. *Geology and Resources of Some World Oil-Shale Deposits* (2006). DOI:10.3133/SIR29955294
- [2] Kang Zhiqin, Yangsheng Zhao, Dong Yang. *Appl. Energy*, **269**, 115121 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115121>
- [3] A. Reva, A. Blinderman. *Underground Gasification of Oil Shale. Underground Coal Gasification and Combustion* (Woodhead Publishing, 2018), p. 527–579. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100313-8.00016-5>
- [4] H. Vinegar. Shell's in-situ Conversion Process. 26th Oil Shale Symposium 18, 1–23 (2006).
- [5] A.R. Brandt. *Environ. Sci. Technol.*, **42** (19), 7489 (2008). <https://doi.org/10.1021/es800531f>
- [6] V.V. Lopatin, S.M. Martemyanov, A.A. Bukharkin, I.A. Koryashov. *Underground Pyrolytic Conversion of Oil Shale. Proceed. 8th Intern. Forum on Strategic Technol.*, **1**, 547 (2013). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/552/1/012012>
- [7] S.M. Martemyanov, A.A. Bukharkin, B.T. Ermagambet, Z.M. Kasenova. *Interna. J. Coal Preparation and Utilization*, 1–11. (2021). <https://doi.org/10.1080/19392699.2021.1957855>
- [8] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel. *High Voltage Engineering. Fundamentals*. Second edition — Butterworth-Heinemann, 2000. 539 p.
- [9] J. Densley. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, **17** (5), P. 14 (2001). <https://doi.org/10.1109/57.901613>
- [10] F.H. Kreuger. *Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment* (Butterworths, 1989), 193 p.
- [11] L.A. Dissado, J.C. Fothergill. *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers* (Iet, 1992), v. 9. DOI: 10.1049/PBED009E
- [12] A.A. Bukharkin, V.V. Lopatin, S.M. Martemyanov, I.A. Koryashov. *J. Phys.: Conf. Series.*, **552** (1), (2014). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/552/1/012012>
- [13] X. Chen, P.H.F. Morshuis, Q. Zhuang, J.J. Smit, Z. Xu. 10th IEEE Intern. Conf. Solid Dielectrics. IEEE, 2010. <https://doi.org/10.1109/ICSD.2010.5568110>
- [14] M.G. Danikas, F.K. Prionistis. *Facta Universitatis(NIS). Ser.: Elec. Energ.* **17**, 99 (2004). <https://doi.org/10.1109/ELINSL.2008.4570405>
- [15] R. Schwarz, T. Judendorfer, M. Muhr. *Annual Report Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. IEEE*, 400 (2008). <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2008.4772825>
- [16] E. Lemke, S. Berlijn, E. Gulski, H.M. Muhr, E. Pultrum, T. Strehl, G. Rizzi. *Electra*, **241**, 60 (2008).
- [17] Y. Suzuoki, F. Komori, T. Mizutani. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **29** (11), 2922 (1996).
- [18] R. Vogelsang, B. Fruth, T. Farr, K. Fröhlich. *Europ. Trans. Electrical Power*, **15** (3), 271 (2005). <https://doi.org/10.1002/etep.60>
- [19] J.H. Schön. *Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics* (Elsevier, 2015)
- [20] R.S. Carmichael. *Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals* (1988) (CRC press, 2017), 756 p.
- [21] D. O'Neill, R.M. Bowman, J.M. Gregg. *Appl. Phys. Lett.*, **77** (10), 1520 (2000). <https://doi.org/10.1063/1.1290691>
- [22] Y.J. Li, X.M. Chen, R.Z. Hou, Y.H. Tang. *Solid State Commun.*, **137** (3), 120 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2005.11.017>
- [23] J. Liu, C.G. Duan, W.G. Yin, W.N. Mei, R.W. Smith, J.R. Hardy. *Phys. Rev. B*, **70** (14), 144106 (2004). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.70.144106>
- [24] W. Li, R.W. Schwartz. *Phys. Rev. B*, **75** (1) 012104 (2007). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.75.012104>
- [25] V.F. Vazhov, V.M. Muratov, S.Y. Datskevich, M.Y. Zhurkov, R.R. Gafarov. *Phys. Solid State*, **55** (4), 725 (2013). <https://doi.org/10.1134/S1063783413040355>
- [26] S.J. Dodd, N.M. Chalashkanov, J.C. Fothergill. 2010 10th IEEE Intern. Conf. on Solid Dielectrics. IEEE, 1 (2010). <https://doi.org/10.1109/ICSD.2010.5568217>
- [27] J.V. Champion, S.J. Dodd. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **34** (8), 1235 (2001). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/34/8/314>
- [28] E. Lemke. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, **28** (6), 11 (2012). <https://doi.org/10.1109/MEI.2012.6340519>
- [29] R. Vogelsang, B. Fruth, T. Farr, K. Fröhlich. *Europ. Trans. Electrical Power*, **15** (3), 271 (2005). <https://doi.org/10.1002/etep.60>
- [30] J.V. Hampion, S.J. Dodd, J.M. Alison. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **29** (10), 2689 (1996). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/29/10/023>