

Электрическая прочность горных пород на импульсном напряжении при воздействии высоких давлений и температур

© В.Ф. Важов, В.М. Муратов, С.Ю. Дацкевич, М.Ю. Журков, Р.Р. Гафаров

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, Россия

E-mail: muratov@hvd.tpu.ru

(Поступила в Редакцию в окончательном виде 20 сентября 2012 г.)

Впервые проведены исследования электрической прочности горных пород (гранит, известняк, песчаник) при совместном воздействии давления до 35 МПа и температуры до 120°C в системе электродов стержень–стержень, расположенных на одной поверхности образца, и острие–плоскость в жидкой среде бурового раствора. При совместном повышении давления и температуры для электродов острие–плоскость электрическая прочность горных пород непрерывно возрастает (особенно быстро в диапазоне давлений 10–24 МПа и температур 35–85°C), а для электродов стержень–стержень, размещенных на одной поверхности образца, электрическая прочность изменяется с максимумом при давлениях 5–12 МПа и температурах 20–35°C.

Работа выполнена при поддержке фирмы Schlumberger и Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF, грант N REO-1360-TO-02).

Известен электроимпульсный (ЭИ) способ разрушения твердых диэлектрических, полупроводящих материалов и горных пород, основанный на инверсии электрической прочности диэлектрических жидкостей и твердых тел, когда при временах воздействия напряжения менее одной микросекунды электрическая прочность жидких диэлектриков и даже воды оказывается выше электрической прочности твердых диэлектриков [1–4]. В этом случае при помещении в жидкую диэлектрическую среду твердого диэлектрика, с одной поверхностью которого контактируют высоковольтный и заземленный электроды, происходит внедрение канала разряда в твердый диэлектрик и его пробой.

В настоящее время ведется разработка ЭИ-способа применительно к бурению скважин в крепких горных породах [1,3,5]. Совершенствование ЭИ-способа бурения с целью его использования для проходки глубоких и сверхглубоких скважин требует исследования процессов, характерных для глубин до 3–4 km. В связи с этим наибольший интерес представляет изучение пробоя жидких и твердых диэлектриков при высоких давлениях и температурах.

Необходимо рассмотреть две принципиально разные задачи:

1) сквозной пробой в системе электродов острие–плоскость при расположении горной породы между электродами (в этой системе электродов был открыт ЭИ-способ);

2) внедрение в системе электродов стержень–стержень при размещении электродов на одной поверхности горной породы (реализуется в ЭИ-бурении).

В литературе вопросы поведения электрической прочности твердых диэлектриков и горных пород при высоких давлениях и температурах изучаются, как правило, при их раздельном воздействии [1,6–12]. Работы выполнены в системе электродов острие–плоскость. Данные

о зависимости электрической прочности от давления достаточно противоречивы [7,9,10]. Но можно отметить следующую тенденцию: при всестороннем сжатии образцов из пористых материалов их электрическая прочность на первых десятках атмосфер возрастает, а при дальнейшем повышении давления стабилизируется [6,7,9,11,12]. Электрическая прочность твердых диэлектриков с повышением температуры снижается при некотором ее значении, разным для различных диэлектриков [6,8,10,11]. Например, для некоторых горных пород это значение составляет более 80°C [7,11]. Работы по изучению электрической прочности при внедрении канала разряда в твердые диэлектрики, полупроводники, горные породы при одновременном воздействии высоких давлений и температур в конфигурации электродов стержень–стержень в известной нам литературе отсутствуют.

Таким образом, целью данной работы является исследование электрической прочности горных пород при одновременном воздействии высоких давлений и температур в жидкой среде во временном интервале, характерном для ЭИ-способа, при использовании указанных выше электродных систем.

Исследования проводились в металлической камере объемом 6200 см³. Высокое напряжение вводилось в камеру при помощи высоковольтного ввода, изготовленного из поликарбоната. Источником высокого напряжения являлся генератор импульсных напряжений Аркадьева–Маркса с номинальным напряжением 500 kV и емкостью в разряде 0.01 μF. Длительность фронта импульса напряжения $\tau_f = 0.25 \mu s$. Характеристическое сопротивление генератора составляло 22.3 Ω.

Температура внутри камеры изменялась от 17 до 120°C при помощи нагревателей, расположенных внутри камеры, а измерение температуры проводилось отградуированной термопарой. Испытательная камера и

Таблица 1. Пористость горных пород

Материал	Пористость, %
Кварцит	2.7
Песчаник	11.9
Известняк	5.7
Гранит	3.4

гидравлическая система к ней позволяли создавать и поддерживать давление до 40 МПа при температуре 120°C. Выбор значений температуры и давления обусловлен известными закономерностями их изменения с увеличением глубины скважины [13].

В качестве образцовых горных пород выбраны песчаник (предел прочности при одноосном сжатии $\sigma \approx 86$ МПа), известняк ($\sigma \approx 120$ МПа) и гранит ($\sigma \approx 160$ МПа) как широко распространенные в природе. Кроме того, они резко различаются по физико-механическим свойствам и строению. Образцы горных пород вырезались для каждого исследуемого материала из одного блока камня, толщина образцов составляла 18–23 мм. В связи с трудоемкостью проведения опытов количество образцов в партии не превышало 5–10 штук. Все эксперименты проводились в жидкой среде, в качестве которой нами выбран буровой раствор типа VersaPro, используемый для бурения нефтяных и газовых скважин. Раствор представляет собой эмульсию, состоящую более чем из десятка ингредиентов жидких и твердых веществ в масляной среде.

Пробой всегда осуществлялся на фронте или амплитуде импульса напряжения с минимальным перенапряжением, так как оно влияет на величину пробивного напряжения [6]. Измерение параметров импульса напряжения при пробое осуществлялось при помощи малоиндуктивного омического делителя и цифрового осциллографа типа Tektronix TDS3032B. Точность измерений не хуже $\pm 3.5\%$.

Поскольку большинство твердых диэлектриков, и особенно горные породы, обладает определенной пористостью, перед каждым опытом после установления необходимого давления и температуры образцы выдерживались в камере в течение часа для пропитки. Известно, что при давлении 5 МПа за одну минуту образец из кварцита пропитывается трансформаторным маслом на глубину 1.5 мм, а при давлении 15 МПа — на 4 мм [7]. При этом пористость кварцита меньше, чем у исследуемых нами горных пород. В табл. 1 приведены средние значения пористости рассматриваемых горных пород [20]. Увеличение температуры и давления окружающей среды ускорит пропитку. Измерения глубины пропитки, проведенные нами на песчанике в используемом буровом растворе при температуре $T = 17^\circ\text{C}$, дали следующие результаты: при давлении $P = 5$ МПа скорость пропитки составляет 0.19 мм/мин, при $P = 20$ МПа — 0.2 мм/мин, при 25 МПа — 0.25 мм/мин. Следовательно, при выдержке образцов в буровом растворе скорость пропитки

наших образцов уменьшается по сравнению с кварцитом в трансформаторном масле в 8–20 раз за счет большей вязкости и плотности раствора по сравнению с трансформаторным маслом. Кроме того, с увеличением глубины пропитки скорость ее уменьшается при неизменном давлении. За час образцы не успевают пропитаться буровым раствором на всю толщину. Выбор данного времени пропитки образцов обусловлен в первую очередь возможностью пропитки исследуемых горных пород на глубину не менее глубины внедрения канала разряда $H = 0.32S$, где S — величина межэлектродного промежутка [1]. Например, при $S = 20$ мм $H = 6.4$ мм, время пропитки песчаника на указанную глубину при $P = 5$ МПа составляет 31.6 min.

Для создания резко неоднородного электрического поля выбрана электродная система типа острие—плоскость, изготовленная из нержавеющей стали: радиус плоскости 50 мм, радиус острия, заточенного на конце под углом 30° , составлял 0.25 мм. Размеры электродов подобны используемым в системах, которые наиболее часто рассматриваются в литературе [1,6,7,9–11,15–18]. Для электродной системы стержень—стержень использовались стержни диаметром 10 мм с плоским срезом под углом 45° на торце.

Буровой раствор, выбранный нами для экспериментов, применительно к ЭИ-способу не изучен. Необходимость измерения электрической прочности и электрического сопротивления бурового раствора обусловлена возможностью применения его при высоких давлениях и температурах для ЭИ-технологии бурения глубоких скважин, поскольку известно, что при удельном сопротивлении жидкости менее $1 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ ЭИ-бурение невозможно [1].

Нами измерялось электрическое сопротивление бурового раствора для электродной системы типа острие—плоскость (при расстоянии между электродами $S = 20$ мм) в зависимости от давления при низком напряжении с помощью мегаомметра Ф4102/2-1М класса точности 1.5. Измерения показали, что изменение давления в диапазоне 0.1–35 МПа не оказывает влияния на величину сопротивления бурового раствора. Подобный результат ранее получен в работе [19], где отмечается, что для жидких диэлектриков удельная проводимость и токи насыщения при небольших напряжениях не зависят от давления. Удельное сопротивление любой жидкости существенно зависит от температуры, так как с увеличением температуры возрастает подвижность ионов и степень тепловой диссоциации жидкости [10,16,19]. На рис. 1 приведена полученная зависимость изменения сопротивления бурового раствора от давления и температуры. Измеренное сопротивление бурового раствора R при совместном воздействии повышенных давления и температуры ($T = 120^\circ\text{C}$ и $P = 35$ МПа) уменьшилось в 16.8 раза по сравнению с нормальными условиями. Быстрое снижение R происходит до температуры $\sim 50^\circ\text{C}$. Тем не менее при $T = 120^\circ\text{C}$ сопротивление бурового раствора остается достаточно высоким ($R = 1.85 \text{ M}\Omega$), и он может быть использован для ЭИ разрушения.

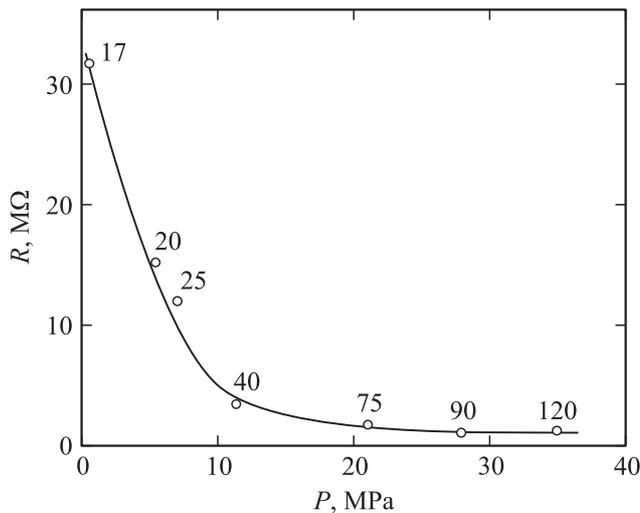


Рис. 1. Зависимость сопротивления бурового раствора от температуры и давления. Значения температуры (в °С) указаны около точек.

Определенный интерес в настоящей работе вызывает влияние совместного воздействия температуры и давления на импульсную электрическую прочность бурового раствора. Ранее [9] исследована импульсная электрическая прочность в зависимости от давления (до 35 МПа) для ряда жидкостей, в том числе и для данного бурового раствора. Его электрическая прочность быстро возрастает до давления 5 МПа и остается неизменной до давления 35 МПа. Это связано с наличием и поведением газа на электродах и в жидкости, а также с образованием газа при воздействии сильного электрического поля [15,16]. Эмульгирование раствора способствует насыщению газовой фазой как жидких, так и твердых веществ бурового раствора. Для подобной жидкости наиболее вероятен пузырьковый механизм зажигания разряда, который чувствителен к внешнему давлению [9,16,18]. Для технических жидкостей, содержащих различного рода примеси, при воздействии импульсного напряжения электрическая прочность медленно уменьшается при увеличении температуры вплоть до близкой к точке вскипания, что обусловлено изменением вязкости и плотности жидкости и их зависимостью от температуры, содержания влаги и растворенного газа, а также перераспределения последних между эмульгированным и молекулярно-растворенным состояниями [16].

В экспериментах по определению электрической прочности для сравнительного анализа в качестве основной характеристики используется значение средней пробивной напряженности электрического поля $\bar{E} = \bar{U}/S$, где \bar{U} — среднее значение пробивного напряжения для серии экспериментов (в одной партии образцов), S — среднее расстояние между электродами.

На рис. 2 приведена зависимость изменения \bar{E} бурового раствора при одновременном воздействии давления P и температуры T для электродной системы острие—плоскость (кривая 4). Отклонение значений темпера-

туры при конкретной величине давления в интервале $T > 100^\circ\text{C}$ не превышало 10°C . Как следует из рис. 2, увеличение давления до 5 МПа и температуры до 20°C вызывает быстрое возрастание \bar{E} бурового раствора в 1.37 раза. Поскольку изменение температуры в узком диапазоне (от 17 до 20°C) практически не влияет на электрическую прочность жидких диэлектриков [16,18], увеличение \bar{E} в основном обусловлено повышением давления до 5 МПа. Дальнейшее повышение давления и температуры приводит к снижению \bar{E} вплоть до $P = 35$ МПа и $T = 120^\circ\text{C}$ в 1.29 раза по сравнению с максимальным значением. Можно предположить, что это в первую очередь связано с повышением температуры и, как следствие, с изменением состояния жидкости: уменьшением вязкости и плотности, что снижает ее электрическую прочность [15,16,19]. Тем не менее электрическая прочность бурового раствора в этих условиях удовлетворяет требованиям ЭИ-технологии.

При исследовании электрической прочности горных пород в буровом растворе при совместном воздействии давления и температуры в системе электродов острие—плоскость острый электрод устанавливался непосредственно на поверхность образца; таким образом, величина межэлектродного промежутка S была обусловлена его толщиной. На рис. 2 для данной электродной системы приведены полученные зависимости изменения электрической прочности исследуемых горных пород от давления и температуры (кривые 1–3). Для всех горных пород характерным является увеличение электрической прочности при одновременном повышении давления и температуры. Это увеличение в диапазоне давлений $P > 10$ МПа и температур $T > 35^\circ\text{C}$ зависит в первую очередь от размера области в образце, не пропитанной буровым раствором, и пористости породы. Косвенно это подтверждается данными табл. 2,

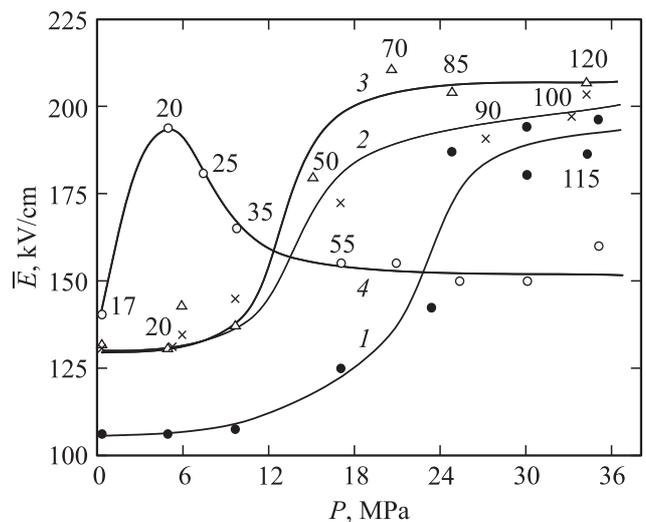


Рис. 2. Зависимость электрической прочности горных пород от давления и температуры для электродов острие—плоскость. Значения температуры (в °С) указаны около точек. 1 — песчаник, 2 — известняк, 3 — гранит, 4 — буровой раствор.

Таблица 2. Относительное увеличение электрической прочности горных пород

Материал	\bar{E}_1/\bar{E}_0
Песчаник	1.79
Известняк	1.58
Гранит	1.6

где приведено относительное увеличение электрической прочности \bar{E}_1/\bar{E}_0 горных пород. Здесь \bar{E}_1 — пробивная напряженность горной породы при давлении 35 МПа и температуре 120°C, а \bar{E}_0 — пробивная напряженность при атмосферном давлении и температуре 17°C. Из табл. 2 видно, что при совместном воздействии давления и температуры для более пористого песчаника увеличение \bar{E}_1 больше, чем для известняка и гранита, так как для области с высокой пористостью, не пропитанной буровым раствором, увеличение давления приводит к возрастанию пробивного напряжения.

Из работы [9] следует, что без нагревания во всем исследованном диапазоне давлений (0–35 МПа) электрическая прочность горных пород, указанных на рис. 2, ниже, чем в случае бурового раствора. Следовательно, при наших условиях эксперимента превышение электрической прочностью горных пород электрической прочности бурового раствора при совместном воздействии давления и температуры (рис. 2) объясняется определяющим влиянием давления на электрическую прочность горных пород, так как образцы горных пород в большей части не пропитаны буровым раствором, а для твердых диэлектриков при электрическом пробое не должно быть большой температурной зависимости пробивного напряжения. Например, для каменной соли пробивное напряжение в диапазоне температур 0–200°C остается неизменным [10].

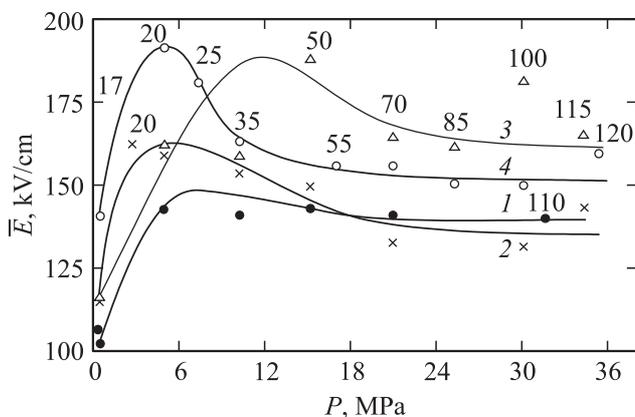


Рис. 3. Зависимость электрической прочности горных пород от давления и температуры для электродов стержень–стержень. Значения температуры (в °C) указаны около точек. 1 — песчаник, 2 — известняк, 3 — гранит, 4 — буровой раствор.

На рис. 3 (кривые 1–3) приведены результаты экспериментов при внедрении в системе электродов стержень–стержень. Характер зависимостей электрической прочности горных пород от давления и температуры при внедрении канала разряда в них практически определяется зависимостью для бурового раствора (рис. 3, кривая 4), поскольку за время выдержки образцов в испытательной камере в течение часа перед пробоем они успевают пропитаться жидкостью на глубину внедрения канала разряда, величина которой составляет не более 6.4 мм.

При внедрении канала разряда электрическая прочность горных пород при давлении $P = 35$ МПа и температуре $T = 120^\circ\text{C}$ мало отличается от прочности бурового раствора. Отклонение составляет 3.2–12.8%, что подчеркивает определяющее влияние бурового раствора на электрическую прочность горных пород. При давлении $P < 10$ МПа и температуре $T < 35^\circ\text{C}$ определяющее влияние на увеличение электрической прочности горных пород оказывает давление. Дальнейшее увеличение давления и температуры приводит к тому, что основное влияние на электрическую прочность горных пород оказывает поведение жидкой среды при повышении температуры (рис. 3, кривая 4).

Таким образом, электрическая прочность горных пород в жидкой среде при одновременном увеличении давления и температуры возрастает как при сквозном пробое, так и при внедрении. При сквозном пробое электрическая прочность горных пород растет вплоть до давления 35 МПа и температуры 120°C. При внедрении имеет место максимум электрической прочности при давлении 5–12 МПа и температуре 20–35°C. Разный характер изменения электрической прочности горных пород при совместном воздействии высоких давлений и температур при сквозном пробое и внедрении обусловлен процессами пропитки горных пород раствором. В первом случае при наличии непропитанной области в образцах основным фактором, влияющим на электрическую прочность горных пород в диапазоне $P > 12$ МПа, является давление. Для второй электродной системы, когда вся область развития канала разряда пропитана буровым раствором, основным фактором, влияющим на электрическую прочность горных пород в диапазоне $P > 5$ МПа, является температура, которая определяет электрическую прочность жидкой фазы в образце.

Список литературы

- [1] Б.В. Семкин, А.Ф. Усов, В.И. Курец. Основы электроимпульсного разрушения материалов. Наука, СПб. (1995). 276 с.
- [2] Г.А. Воробьев, А.Т. Чепиков, В.Ф. Важов. Изв. вузов. Физика 12, 110 (1998).
- [3] В.П. Малахов. Автореф. канд. дис. Автореф. дисс. канд. техн. наук. Томск (1968). 20 с.
- [4] Г.А. Месяц. Письма в ЖТФ 31, 24, 51 (2005).

- [5] V.F. Vazhov, M.Yu. Zhurkov, V.V. Lopatin, V.M. Muratov. *J. Mining Sci.* **44**, 176 (2008).
- [6] А.А. Воробьев, Г.А. Воробьев. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. Высш. шк., М. (1966). 224 с.
- [7] И.И. Каляцкий, В.В. Кривко. Изв. ТПИ **149**, 163 (1966).
- [8] Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. Электротехнические материалы. Энергия, Л. (1977). 352 с.
- [9] S.Y. Dazkevich, R.R. Gafarov, V.V. Lopatin, V.M. Muratov, V.F. Vajov. Изв. вузов. Физика *11*, (Приложение), 484 (2006).
- [10] Физика диэлектриков / Под ред. А.Ф. Вальтера. ГТТИ, Л.–М. (1932). 560 с.
- [11] А.А. Воробьев, Г.А. Воробьев, Е.К. Завадовская, И.И. Каляцкий, В.В. Кривко, В.Ф. Панин, Б.В. Семкин, Н.Н. Торбин, В.Я. Ушаков, А.Т. Чепиков. Импульсный пробой и разрушение диэлектриков и горных пород. Изд-во ТГУ, Томск (1971). 206 с.
- [12] Я.З. Месенжник, Л.Я. Прут. Электричество *3*, 54 (1982).
- [13] И.М. Дворов. Глубинное тепло Земли. Наука, М. (1972). 312 с.
- [14] Справочник физических свойств горных пород / Под ред. Н.В. Мельникова, Р.В. Ржевского. Недра, М. (1975). 279 с.
- [15] Ю.В. Горшин. Физические процессы формирования электрического пробоя конденсированных диэлектриков. Энергоатомиздат, М. (2008). 212 с.
- [16] В.Я. Ушаков, В.Ф. Климкин, С.Н. Коробейников, В.В. Лопатин. Пробой жидкостей при импульсном напряжении. Изд-во НГЛ, Томск (2005). 488 с.
- [17] И.И. Каляцкий, В.В. Кривко. В сб.: Пробой диэлектриков и полупроводников / Под ред. А.А. Воробьева. Энергия, М.-Л. (1964). С. 249.
- [18] В.Я. Ушаков. Изоляция установок высокого напряжения. Энергоатомиздат, М. (1994). 496 с.
- [19] А. Никурадзе. Жидкие диэлектрики. ОНТИ, М.-Л. (1936). 236 с.