

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет»**

на правах рукописи

Петренко Евгений

**МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ ГОРНЫХ ПОРОД В
УСЛОВИЯХ ОДНОПОЛЯРНОГО И ДВУПОЛЯРНОГО ИМПУЛЬСА
НАПРЯЖЕНИЯ**

Шифр и наименование специальности:

2.4.4 – Электротехнология и электрофизика

диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,

профессор

Пушкарев Александр Иванович

Томск - 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	14
1.1 Анализ состояния вопроса электроимпульсного разрушения материалов	14
1.2 Электрический разряд как инструмент для разрушения горных пород	18
1.3 ЭИ технологии: бурение, дробление, резание и др. Сравнение с традиционными способами механического воздействия	20
1.3.1 Бурение	22
1.3.2 Резание	23
1.3.3 Дробление.....	24
1.3.4 Электроимпульсное разрушение бетона и железобетона	26
1.3.5 Другие применения ЭИ способа разрушения.....	27
1.4 Пробой различных сред на импульсном напряжении	28
1.4.1 Пробой газов	29
1.4.2 Пробой жидких сред.....	30
1.4.3 Пробой твердых диэлектриков.....	31
1.5 Гипотезы механизма внедрения канала разряда в твердый диэлектрик	32
1.6 Проблемы, стоящие перед ЭИ технологиями.....	34
1.6.1 Изоляция	35
1.6.2 Рабочие жидкости.....	38
1.7 Влияние полярности на механизм внедрения	40
1.8 Выводы и задачи исследования	43
ГЛАВА 2 МЕТОДИКА И СРЕДСТВА ЭКСПЕРИМЕНТА	45
2.1 Экспериментальные образцы горных пород	45
2.2 Установка для экспериментов с импульсами разной полярности	46
2.3 Установка для экспериментов по организации многоканального пробоя горных пород	50
2.4 Электродная система.....	54
2.5 Средства измерения.....	57

2.6	Описание средств и методики микроскопии образцов гранита	58
2.7	Моделирование процесса пробоя горной породы.....	59
ГЛАВА 3 ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАЗРУШЕНИЕ ГРАНИТА ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫМ СПОСОБОМ		62
3.1	Экспериментальные результаты по пробую диэлектриков двуполярным импульсом напряжения	62
3.1.1	Песчаник.....	67
3.1.2	Гранит	68
3.1.3	Вода.....	68
3.1.4	Воздух	69
3.2	Экспериментальные результаты по многоканальному разрушению горных пород двуполярным импульсом напряжения.....	70
3.3	Экспериментальные результаты по многоканальному пробую и разрушению гранита однополярным импульсом напряжения.....	75
3.4	Моделирование	81
3.4.1	Структура гранита	82
3.4.2	Моделирование разрушения и роста трещин	84
3.4.3	Результаты моделирования.....	86
3.5	Микроскопия.....	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		99
ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА		101

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. 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. Особенно остро это ощущается при обработке крепких и особо крепких горных пород, таких как гранит, базальт, диабаз и т. п. Дальнейшее совершенствование способов обработки и переработки горных пород возможно за счет применения принципиально новых механизмов разрушения. Одним из таких механизмов является разрушение материала за счет расширения предварительно внедренного в объем материала канала электрического разряда. Удельная затраченная энергия на отбойку единицы объема породы в этом случае, все еще недостижима в механических системах в большей степени благодаря использованию для отрыва материала сил растяжения, а не сжатия и сдвига, как в традиционных механических способах, а также формированию более крупных фрагментов отколотой породы. Поэтому при соответствующем аппаратном оформлении данные технологии являются перспективными, особенно при глубоком (3-5 км) и сверхглубоком (6-10 км) бурении скважин, например, для геотермальной энергетики, при строительстве тоннелей и объектов захоронения отработавшего ядерного топлива в скальных массивах, в технологиях разрядно-механического бурения, а также в технологиях снятия поверхностного слоя материала, например, бетона, особенно актуальных при выводе из эксплуатации объектов атомной энергетики.

В настоящее время внедрение вышеназванных технологий в промышленность сдерживается сложностью технической реализации надежного оборудования. Современный срок службы элементной базы (конденсаторы, разрядники) не вполне удовлетворяет промышленным требованиям электроимпульсных (ЭИ) технологий. Элементы со сроком службы $\geq 10^9$ импульсов либо не выпускаются совсем, либо не удовлетворяют по стоимости и масса-габаритным характеристикам. Срок службы оборудования, в большей степени его изоляции, его

масса-габаритные и, следовательно, стоимостные характеристики, в том числе определяется уровнем рабочего напряжения, которое для обозначенных ЭИ технологий обычно лежит в пределах от 250 до 600 кВ. При этом верхний предел может быть значительно выше 600 кВ, что зависит от расстояния между электродами в электродной системе. В свою очередь, например для увеличения производительности ЭИ бурения необходимо увеличивать диаметр буровых наконечников (диаметр скважин), что неизбежно влечет увеличение межэлектродных расстояний и как следствие, увеличение уровня импульсного напряжения. В связи с этим, актуальны задачи как по снижению рабочего напряжения и запасаемой энергии генератора, так и по повышению производительности разрушения без необходимости увеличения расстояния между электродами.

Данные задачи могут быть решены путем применения двух генераторов импульсного напряжения (ГИН) обеспечивающих одновременное воздействие импульсов разной полярности на горную породу, что позволяет более чем в 2 раза снизить рабочее напряжение и запасаемую энергию каждого ГИН, тем самым увеличив срок их эксплуатации, а организация пробоя одновременно в нескольких межэлектродных промежутках за один импульс напряжения может позволить увеличить производительность разрушения за счет увеличения площади охвата и, соответственно, увеличения объема разупрочнения горных пород за один импульс напряжения, не прибегая к увеличению межэлектродного расстояния, что также снижает требования к изоляции компонентов ЭИ установки и является большим шагом на пути решения наиболее главных проблем технологии. При доведении технологии до промышленной, Россия может взять первенство в технологиях бурения скважин в условиях Арктики.

Степень разработанности темы исследований. Эффект внедрения разряда в твердый диэлектрик, находящийся под слоем жидкости, был открыт в 60-х годах прошлого столетия. Основоположниками ЭИ технологии являются профессора А.А. Воробьев, Г.А. Воробьев, А.Т. Чепиков, а непосредственными

руководителями коллективов и разработчиками технологии И.И. Каляцкий, С.С. Сулакшин, Ю.Б. Фортес, Б.В. Сёмкин, А.И. Лимасов, А.Ф. Усов, В.И. Курец, В.Т. Казуб, Г.С. Коршунов, С.Я. Рябчиков, Н.Ф. Побежимов, Н.Е. Коваленко. Большой вклад в развитие также внесли В.Ф. Важов, Н.Т. Зиновьев, В.Я. Ушаков, А.А. Дульзон, В.В. Лопатин, В.М. Муратов и др. Среди зарубежных исследователей можно отметить работы B.S. Aadnoy, A. Rodland, R.F. Mitchell, M.L. Payne, H. Inoue, I. Nishizawa, S. Katsuki, H. Akijama, Wolfgang Frey, H. Bluhm, William M. Moeny.

На основе данного эффекта предложены и разработаны такие ЭИ технологии разрушения и модификации материалов, как бурение, резание, снятие поверхностного слоя, дробление и т.п. В настоящее время ЭИ технологии вызывают повышенный интерес со стороны как мирового научного сообщества, так и крупных промышленных предприятий, преимущественно за пределами Российской Федерации. Сегодня в данной области ведут исследования такие университеты, как Томский политехнический университет (Россия), Technische Universität Dresden (Германия), China University of Geosciences (Китай), а также зарубежные компании Komatsu, Schlumberger, Metsa, Unodrill, Halliburton, SwissGeoPower, Selfrag. ЭИ бурение крепких горных пород (гранитов) рассматривается как перспективная технология для организации скважин геотермальной энергетики в ряде зарубежных компаний. Следует отметить, что первенство в разработке указанной технологии принадлежит Томскому политехническому университету. За более чем полувековой период в ТПУ получено огромное количество научной информации. В настоящее время эта информация распространяется по миру и привлекает различных исследователей. В 70-х годах в НИИ ВН при ТПИ (Научно-исследовательский институт высоких напряжений Томского политехнического института), ныне именуемый ИШНПТ ТПУ (Инженерная школа новых производственных технологий Томского политехнического университета), проведены исследования возможности ЭИ бурения вечномёрзлых грунтов в условиях Севера, и получены впечатляющие результаты – скорость проходки скважины диаметром 200 мм достигала 12,2 м/ч.

Испытания проводились в Магаданской области на руднике «Экспериментальный». Однако, несмотря на большой пласт исследований, проведенных в 70-х годах, и всевозрастающий интерес к ЭИ технологии в современное время, в том числе за рубежом, до сих пор не проведены исследования воздействия двуполярного импульса напряжения на различные среды, а также не уделено внимание изучению многоканального электрического пробоя в многозачерных системах электродов, что представляет значительный научный и практический интерес.

Целью диссертационной работы является определение возможности и условий одновременного электрического пробоя горных пород в нескольких межэлектродных промежутках, как с различным уровнем напряженности электрического поля, так и в средах с различной диэлектрической проницаемостью, а также определение возможности снижения рабочего напряжения путем воздействия импульсами высокого напряжения разной полярности.

Для достижения поставленной цели решались **следующие задачи:**

1. Разработать стенд для проведения испытаний по разрушению горных пород импульсами разной полярности, как в двух, так и в многоэлектродной системе электродов.

2. Определить зависимость количества внедренных каналов разряда в горную породу и производительность разрушения от напряженности электрического поля при воздействии единичным импульсом напряжения.

3. Определить уровень пробивного напряжения для воздуха, воды и горной породы (песчаник, гранит) при подаче двуполярного импульса напряжения и сравнить полученные данные с известными данными для этих сред в условиях однополярного импульса напряжения.

4. Создать структурную карту гранита на основе реальных образцов для моделирования процессов волновой динамики, происходящих в процессе пробоя горной породы.

5. Провести моделирование процессов волновой динамики с использованием созданной структурной карты гранита в условиях различного количества внедренных каналов разряда, сравнить результаты с данными физических экспериментов.

6. Провести микроскопический анализ поверхности образцов гранита после воздействия импульса напряжения в местах пробоя для определения возможного механизма внедрения канала разряда в гранит.

Научная новизна.

Впервые обнаружено, что одновременное воздействие двух импульсов напряжения разной полярности ведет к снижению пробивного напряжения по сравнению с однополярным импульсом напряжения и в условиях данного исследования достигает: 28% – при пробое песчаника, 23% – гранита, 24% – воды, 25% – воздуха.

Впервые экспериментально показано, что одновременное воздействие двух импульсов напряжения разной полярности позволяет снизить рабочее напряжение каждого генератора более чем в 2 раза.

С ростом напряженности электрического поля при прочих равных условиях, увеличение вероятности осуществления многоканального пробоя гранита наиболее характерно для этиленгликоля и минерального масла.

Внедрению разряда в гранит способствует наличие магнетита, который вызывает искажение и усиление электрического поля, что и определяет траекторию развития разряда.

Предложен способ одновременного воздействия импульсов высокого напряжения разной полярности для разрушения твердого диэлектрика (горных пород).

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в углублении и расширении физических представлений о пробое при внедрении канала разряда в горные породы и влиянии жидких сред на эти процессы.

Предложена гипотеза теоретического объяснения механизма снижения пробивного напряжения при воздействии двуполярным импульсом напряжения.

Прикладная значимость исследования:

– реализация способа разрушения двуполярным импульсом напряжения в электроразрядных технологиях бурения, дробления, резания и снятия поверхностного слоя материала, что позволяет достичь двукратного снижения рабочего напряжения генераторов импульсов высокого напряжения;

– разработанная структурная карта гранита может быть использована для моделирования электровзрыва, исследования процессов волновой динамики и прогнозирования картины разрушения в зависимости от параметров разрядного контура;

– многозазорная электродная система будет использоваться в дальнейших исследованиях в области ЭИ технологий в ОМ ИШНПТ ТПУ и в учебном процессе.

Связь работы с Государственными программами и темами.

Работа выполнялась в рамках научных проектов: проект РФФИ 16-48-700278 р_а «Электроразрядное разрушение бетонных и железобетонных изделий для их переработки и утилизации» (2016 – 2019 гг.); проект РФФИ 19-38-90071 «Пробой твердых горных пород под слоем жидкости в системе наложенных электродов в нескольких межэлектродных промежутках за один импульс» (2019 – 2022).

Методология и методы исследования. Методология исследования основана на комплексном подходе, включающем экспериментальное исследование пробоя горных пород при одновременном воздействии импульсов напряжения разной полярности и в условиях многоканального пробоя при различных уровнях напряженности электрического поля и различных видах жидких сред; компьютерное моделирование процессов (распределение интенсивности касательных напряжений и давлений, построение структурной карты гранита); сопоставление экспериментальных данных и результатов моделирования.

В качестве источников импульсов высокого напряжения были использованы ГИН по схеме Аркадьева – Маркса и генератор на основе импульсного

трансформатора типа EG-350. Пробой горных пород двуполярным импульсом напряжения осуществлялся путем синхронного срабатывания двух ГИН по схеме Аркадьева – Маркса. Для осуществления многоканального пробоя была применена многоазорная система электродов.

Электронная микроскопия образцов гранита выполнена с использованием сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400N с энерго-дисперсионной приставкой Bruker XFlash 4010 для проведения рентгеноспектрального анализа.

При выполнении численного моделирования процесса разрушения и роста трещин под действием электрического разряда была применена хрупко-упругая модель МДТТ (механика деформируемого твердого тела) в динамической постановке. Задача решалась в двумерной постановке, что было обусловлено сложностью задания трехмерной структуры гранита. Выбрана конечно-разностная схема второго порядка точности для решения динамических задач.

Положения, выносимые на защиту.

1. Воздействие двуполярного импульса напряжения на двухэлектродную систему вызывает снижение пробивного напряжения относительно пробоя однополярным импульсом для всех исследованных сред – твердое тело, жидкость, газ.

2. Увеличение диэлектрической проницаемости жидкой среды вызывает рост среднего количества внедренных каналов разряда с понижением производительности единичного внедрения в каждом межэлектродном промежутке при прочих равных условиях.

3. Внедрению канала разряда в гранит способствует наличие магнетита, который вызывает локальное усиление электрического поля, что и провоцирует начало развития разряда в граните.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием известных исследовательских методов и современного оборудования, систематическим

характером проведения экспериментов, измерений и обработкой данных, а также согласием полученных результатов с данными работ других авторов.

Результаты работы были представлены на международных и всероссийских семинарах, симпозиумах и конференциях: Far East Con-2018 – Международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям, 2018 г., Владивосток, Россия; Международная научная конференция «Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития», 2018 г., Томск, Россия; Двадцать пятая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-25), 2019, Крым, Россия; XIIth China-Russia-Belarus Workshop Perspective plasma technologies 2019, Minsk, Belarus; 14th International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" GDP 2019, Tomsk, Russia; Двадцать шестая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-26, Уфа, Башкортостан); 7th International Congress on energy fluxes and radiation effects (EFRE-2020), 2020, Tomsk, Russia.

Основные публикации.

1. E. V. Petrenko, V. F. Vazhov, & A. S. Yudin (2019). Method for Generating a High Voltage Multipolar Impulse in Electropulse Technologies. В 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018 [8602703] (2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.. <https://doi.org/10.1109/FarEastCon.2018.8602703>.

2. A. Pushkarev, A. Prima, V. Ezhov, I. Miloichikova, & E. Petrenko, Determination of the Pulsed Electron Beam Spectrum by Current and Voltage Oscillograms. Laser and Particle Beams, 2021, [8815697]. <https://doi.org/10.1155/2021/8815697>

3. V. F. Vazhov, E. V. Petrenko Space Charge in Polymer Dielectrics Induced by Pulsed and DC Voltages as a Factor Influencing the Time to Breakdown. Physics of the Solid State, 2021, Vol. 63, No. 5, pp. 726–730

4. В.Ф. Важов, Е.В. Петренко, А.С. Юдин Электрическая прочность диэлектриков при воздействии двуполярных импульсов напряжения субмикросекундной длительности // Журнал технической физики, 2022, том 92, вып. 4

Материалы конференций.

1. Е. В. Петренко, В. Ф. Важов, А. С. Юдин. «Исследование внедрения канала разряда в диэлектрике при воздействии разнополярного импульса напряжения» // Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития: сборник научных трудов международной научной конференции, г. Томск, 12–16 ноября 2018 г. – С.181 – 182

2. Петренко Е.В., Юдин А.С., Протопопов И.А. «Электроразрядное разрушение железобетонной шпалы однополярным и двуполярным импульсами в системе наложенных электродов» // Сборник тезисов, материалы Двадцать пятой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-25, Крым): материалы конференции, тезисы докладов: В 1 т.Т.1 – Екатеринбург – Ростов-на-Дону-Крым: издательство АСФ России, 2019. – С.173 – 174

3. Petrenko E. V., Yudin A.S. Formation of multichannel breakdown in electric discharge drilling technologies // XIIth China-Russia-Belarus Workshop Perspective plasma technologies 2019

4. Petrenko E.V., Yudin A.S. Electric discharge destruction of reinforced concrete sleepers with different modes of pulse polarity // 14th International Conference "Gas Discharge Plasmas and Their Applications" GDP 2019: Abstracts. – Tomsk: TPU Publishing House, 2019. – p.205

5. Петренко Е., Юдин А.С. «Влияние индуктивности электродов на формирование многоканального пробоя в горной породе» // Современные материалы и технологии новых поколений: сборник научных трудов II Международного молодежного конгресса, г. Томск, 30 сентября - 5 октября 2019 г. — Томск : Изд-во ТПУ, 2019. — [С. 342-343].

6. Петренко Е., Юдин А.С. «Формирование многоканального пробоя в электроразрядных технологиях бурения» // Материалы Двадцать шестой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-26, Уфа, Башкортостан): материалы конференции, тезисы докладов: В 1 т.Т.1 – Екатеринбург – Ростов-на-Дону – Уфа: ООО "Альтаир", 2020. – С.444

Личный вклад автора заключается в анализе литературных данных, непосредственном участии в разработке, подготовке и проведении экспериментов, анализе и обсуждении результатов. Постановка задач, обсуждение всех научных результатов и положений, изложенных в работе, проведена совместно с Юдиным А.С. По результатам исследования написаны статьи в соавторстве и сделаны доклады на конференциях.

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа изложена на 111 стр., содержит 25 рис., 8 таблиц, 120 источников. Диссертация состоит из введения 3 глав, заключения и списка цитируемой литературы.

ГЛАВА 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Анализ состояния вопроса электроимпульсного разрушения материалов

В связи с постоянным развитием таких отраслей промышленности как горнорудная, нефтегазовая, строительная и др. наблюдается рост объема работ связанных с добычей полезных ископаемых, разрушением вышедших из эксплуатации различных конструкций, работ по разрушению горных пород и т.д. Увеличиваются объемы работ в особо крепких породах для бурения скважин самых разных назначений: для геологоразведочных работ, сооружения промышленных объектов и др.

В мире насчитывается более 40 способов разрушения твердых тел, в частности горных пород [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. Проблема разрушения горных пород новыми физическими способами особую актуальность имеет для работ в скальных породах, т.к. в этих случаях возникает необходимость разрушения особо прочных пород и грунтов.

Анализ используемых сегодня традиционных способов разрушения указывает на то, что в развитии существующих и разработке новых методов делается акцент на совершенствовании инструментов воздействия на горную породу. Тем не менее, производительность существующих методов разрушения остается низкой, а стоимость работ и материалов высокой. Основными причинами этого являются быстрый износ разрушающего инструмента, сложности передачи энергии на забой и низкий КПД. Можно заключить, что традиционные способы разрушения горных пород, основанных на механическом воздействии, практически достигли естественного предела своих технических возможностей. Поэтому непрерывно ведется поиск альтернативных и принципиально новых способов разрушения твердых тел, основанных на последних достижениях науки и техники.

Известно, что электрическая энергия является на сегодня самым совершенным видом энергии для технических применений. Поэтому использование электрической энергии в целях разрушения твердых диэлектрических материалов и горных пород без промежуточных преобразований ее в другие виды энергий разрушения представляется наиболее перспективным направлением. Одним из таких способов, является способ разрушения твердых тел электрическими импульсными разрядами, разработанный в Томском политехническом институте под руководством профессора А.А. Воробьева [10, 11, 12].

На сегодняшний день в Томском политехническом университете и за его пределами проделан целый ряд работ, в которых рассмотрены различные аспекты электроимпульсного (ЭИ) разрушения твердых диэлектриков и горных пород в частности [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31].

За более чем полувековую историю исследований, связанных с ЭИ технологиями, были получены следующие данные:

- физические основы и эффективность процесса ЭИ разрушения твердых тел;
- термодинамические и гидродинамические характеристики канальной стадии импульсного электрического пробоя твердых диэлектриков;
- параметры импульсной электрической прочности горных пород.

Таким образом, были выведены и подтверждены на практике механизмы возникновения и протекания разрядов в толще диэлектрика в слабо и сильно неоднородных полях, изучены параметры получаемого электровзрыва в различных материалах.

Первые работы по электроразрядному разрушению горных пород в лабораторных условиях были выполнены в 1961 г. [10, 17]. Испытательные работы ЭИ буровых установок в полевых условиях были организованы в период 1963–1978 гг., в окрестностях г. Томска, г. Апатиты, г. Лениногорска, на Колыме, БАМе и Курской магнитной аномалии, которые продемонстрировали

конкурентоспособность ЭИ технологий среди самых современных способов бурения.

Данные работы позволили отработать технику и технологию ЭИ бурения и выявить основные проблемы в технологическом оборудовании. В ходе полевых испытаний было пройдено более 1000 метров скважин. Скорость проходки скважины диаметром 250 мм составила 11,4 м/ч при частоте импульсов 10 имп/с. Опыт работы с ЭИ буровыми установками выявил ряд проблем, препятствующих промышленному их производству, которые будут рассмотрены в одной из последующих глав.

Следует отметить, что несмотря на огромное количество проведенных исследований, наиболее эффективная область применения ЭИ способа бурения в то время так и не была определена. Поэтому, были необходимы дальнейшие исследования бурения скважин большого диаметра, ориентируясь на потребности промышленности. Перспективными направлениями являлись: геотермальные скважины, глубокие нефтяные и газовые скважины, прокладка тоннелей, скважины под опоры мостов и захоронение опасных отходов, вентиляционные шахтные скважины и т.д.

Следующий этап истории развития ЭИ технологий пришелся на 1996 г. Впервые был заключен контракт с зарубежной компанией «Komatsu», в рамках которого было необходимо сконструировать ЭИ буровые снаряды для бурения скважин диаметром 300 мм и более в крепких горных породах. В результате было создано и запатентовано в России и за рубежом три изобретения [32, 33, 34].

Позже НИИ ВН начал сотрудничество с такими компаниями-заказчиками как «Statoil» и «UnoDrill ltd» (Норвегия), «Schlumberger» (США-Англия-Франция), Дрезденский технический университет с которыми были заключены контракты на научно-исследовательские работы по ЭИ бурению и резанию, на разработку генераторов высоковольтных импульсов погружного типа.

Развитие ЭИ технологий и требования заказчиков определили необходимость дальнейшего углубления и расширения научных исследований

процессов пробоя и разрушения горных пород и диэлектриков, решения технологических задач при ЭИ бурении и резании. В связи с этим, основными направлениями последующих исследований стали вопросы, связанные с ЭИ бурением.

На сегодняшний день в ТПУ, ИШНПТ проведены испытания электроимпульсного бурения гранитного монолита. В результате была пробурена скважина диаметром 340 мм и глубиной 15 м. При частоте следования импульсов 10 имп/с. средняя скорость проходки составила 0,5 м/ч, а максимальная - 1,6 м/ч. Также, в лабораторных условиях было освоено такое направление как горизонтальное бурение. В результате была создана демонстрационная установка для горизонтального бурения. Заказчиками выступали зарубежные компании: «Komatsu», «Metsa», «Statoil», «Unodrill», «Schlumberger», «Fund4se», «Technische Universitie».

Помимо лаборатории ИШНПТ данными технологиями занимаются в Дрезденском техническом университете. В 2018 году, при финансировании Федеральным министерством экономики и энергетики Германии, научным коллективом данного университета был разработан прототип полностью автономного погружного генератора, который подключается к традиционным механизмам бурения скважин. Цель работы заключалась в освоении электроимпульсного бурения с использованием технической воды в качестве промывочной жидкости. Результатом работы стала проходка 20 см после чего установка вышла из строя. На данный момент о состоянии работ сведений нет. Также, данными технологиями занимаются в Швейцарии используя прототип генератора на звеньях сжатия; Бельгийская компания VITO, которая пропагандирует развитие электроимпульсной технологии применительно к геотермальной технологии применяя в своей работе оборудование, созданное в НИ ТПУ.

На сегодняшний день, исследовательскими коллективами, занимающимися проблемами ЭИ являются:

- Университет геонаук (China University of Geosciences), Китай.
- VITO, Бельгия.
- ТПУ (Томский политехнический университет), Россия.
- SwissGeoPower, Швейцария
- Halliburton, США.

1.2 Электрический разряд как инструмент для разрушения горных пород

Особенностью ЭИ способа является организация электрического пробоя внутри твердого диэлектрика, сопровождающегося его разрушением. Данный механизм воздействия электрического разряда на материал изнутри позволяет обеспечить гораздо меньшие затраты энергии на разрушение, что дает данному способу уникальные технические и технологические особенности, обеспечивающие высокую технико-экономическую эффективность технологических процессов.

Профессором Г.А. Воробьевым было установлено, что с уменьшением длительности импульса напряжения происходит инверсия соотношения электрической прочности сред. То есть на статическом напряжении электрическая прочность твердых диэлектриков превышает прочность жидких диэлектриков, а на импульсном напряжении при длительности импульса менее 10^{-6} с электрическая прочность диэлектрических жидкостей (в том числе технической воды) возрастает настолько, что становится выше прочности твердых диэлектриков и горных пород, в частности.

Сопоставление вольт-секундных характеристик пробоя на фронте косоугольного импульса напряжения для ряда горных пород, трансформаторного масла и технической воды представлено на Рисунок 1. Точка пересечения вольт-секундных характеристик (A_k) есть крутизна фронта импульса напряжения, соответствующая условию равнопрочности сред, именуемая как критическая крутизна импульсного напряжения и являющаяся важным критерием для

характеристики условий ЭИ разрушения. То есть, если рассматривать систему с наложенными на поверхность твердого диэлектрика (горной породы) электродами, находящуюся под слоем жидкости (Рисунок 2), то при подаче на электроды импульсного напряжения с крутизной фронта, соответствующей критической и выше, вероятность внедрения разряда в твердое тело будет более чем 50% [35]. Первые исследования данного эффекта принадлежат А.Т. Чепикову [11]. Автор показал возможность технологического применения ЭИ способа в таких сферах как: бурение скважин, дробление материалов и резание. В процессе поиска применения, разработки и усовершенствования данных технологий были предложены различные варианты реализации технологического процесса.

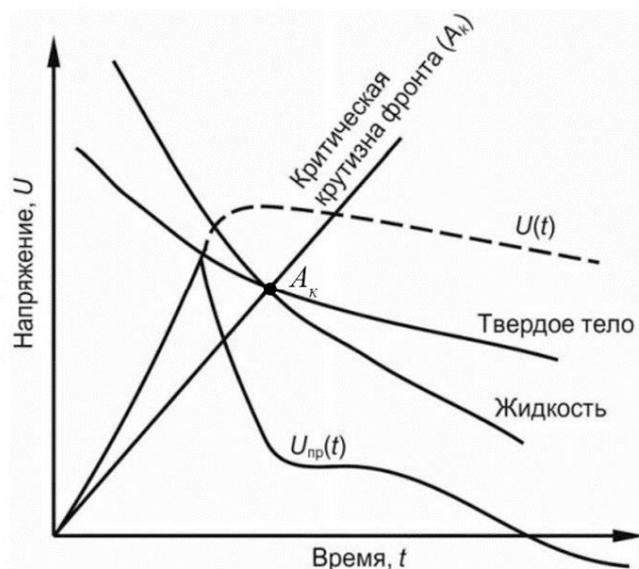


Рисунок 1 – Иллюстрация основной идеи электроимпульсного разрушения; сопоставление вольт-секундных характеристик различных сред (A_k – точка пересечения вольт-секундных характеристик; $U(t)$ – импульс напряжения;

$U_{пр}(t)$ – импульс напряжения при пробое)

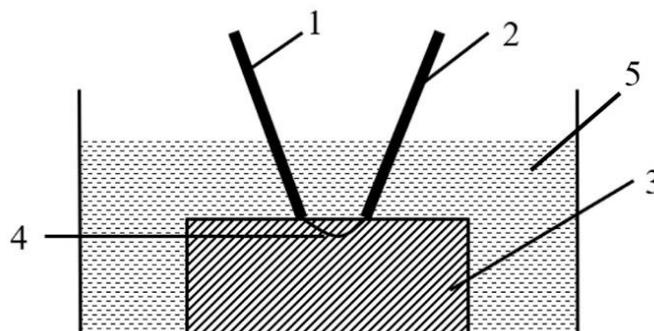


Рисунок 2 – Схема с наложенными на поверхность твердого тела электродами в жидкой среде: 1 – высоковольтный электрод, 2 – заземленный электрод, 3 – разрушаемая порода, 4 – искровой канал, 5 – жидкость

1.3 ЭИ технологии: бурение, дробление, резание и др. Сравнение с традиционными способами механического воздействия

В традиционных (механических) способах главным принципом воздействия на твердый материал (горную породу) является то, что к разрушаемому телу прикладывается статическая или ударная нагрузка с преобладанием напряжений сжатия, либо среза. Разрушение осуществляется при высоком давлении рабочего инструмента на горную породу и сопровождается большими потерями энергии [36, 37, 38, 39]. Кроме того, результатом применения интенсивного давления и ударной нагрузки на горную породу является высокий износ бурового инструмента, и как следствие потери времени на его замену.

Одним из самых затратных и трудоемких технологических процессов во время разведочных работ на месторождениях полезных ископаемых является бурение горных пород. Традиционным способам бурения скважин присущ целый ряд недостатков, который на сегодняшний день устранить практически невозможно [36, 37, 39, 40]:

- низкий КПД (2–10 %);
- наличие сложных кинематических передач;
- быстроизнашивающийся и недостаточно надежный буровой наконечник;

- резкое уменьшение скорости бурения с увеличением крепости разрушаемых пород и диаметра скважин;

- высокая себестоимость буровых работ.

В связи с этим наблюдается возрастающий интерес как к совершенствованию традиционных, так и к поиску и разработке новых способов бурения, дробления и измельчения, обработки твердых минеральных и искусственных материалов. Основными требованиями к новым способам разрушения материалов, являются следующие [35, 38, 39]:

- бездолотное разрушение горных пород, устраняющее ограничения, накладываемые стойкостью породоразрушающего инструмента, и исключаящее потери энергии на трение;

- разрушение горной породы в импульсном режиме, устраняющее значительный расход энергии на пластическую деформацию, позволяющее концентрировать большие мощности при невысоких исходных количествах энергии;

- обеспечение регулируемой степени измельчения, устраняющее затраты энергии на переизмельчение продуктов разрушения;

- нагружение горной породы с преобладанием напряжений разрыва и сдвига, а не сжатия, т.к. прочность на разрыв и сдвиг существенно (в 10–30 раз) ниже прочности на сжатие;

- отсутствие промежуточных трансформаций энергии, связанных со значительными ее потерями;

- отсутствие значительной зависимости производительности процесса разрушения от крепости горных пород;

- хорошая управляемость характером и направленностью разрушения.

Практически всем вышеперечисленным требованиям отвечает ЭИ способ разрушения различных диэлектрических материалов и горных пород.

1.3.1 Бурение

Важнейшая особенность ЭИ бурения заключается в отсутствии необходимости вращать буровой инструмент, прижимать его к поверхности разрушаемого твердого тела, поскольку электрические разряды автоматически распределяются по промежуткам независимо от размера сечения скважины и профиля забоя. Как уже отмечалось, применение способа наиболее эффективно при работе с крепкими и особо крепкими породами и мерзлыми грунтами. Буровой инструмент практически не изнашивается и представляет собой систему объединенных в одну конструкцию потенциальных и заземленных электродов, расположенных равноудаленно друг от друга (Рисунок 3). Размещение электродов не по всей площади забоя, а только по периметру позволяет бурить геологоразведочные скважины с отбором керна.



Рисунок 3 – Внешний вид бурового наконечника диаметром 150 мм

При пробое одного из межэлектродных промежутков, образованный в горной породе откол заполняется промывочной жидкостью, что приводит к его электрическому упрочнению. Аналогичное происходит и в остальных межэлектродных промежутках до тех пор, пока не произойдет разрушение горной

породы по всей площади забоя. Далее буровой снаряд смещается в новое положение. Периодичность и скорость данного цикла зависит от параметров режима буровой установки. В таблице 1 приведены скорости бурения традиционными механическими способами и ЭИ способом.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика скорости бурения

Порода	Коэффициент крепости	Диаметр при ЭИ бурении, мм	Скорость ЭИ бурения, м/ч	Диаметр при механическом бурении, мм	Скорость механического бурения, м/ч
Микрокварцит	16-18	250	3,1	76-95	1,36-2,0
Вечная мерзлота	7-8		12,2		1,15-3,5

Видно, что ЭИ способ бурения обеспечивает бóльшую скорость бурения. Наряду с другими преимуществами (отсутствие вращения, большая глубина бурения на один наконечник и др.), он является привлекательным для бурения глубоких скважин большого диаметра.

1.3.2 Резание

Другим примером применения ЭИ способа является резание, в частности для изготовления блоков из различных горных пород и бетона. Данный способ обеспечивает заданный профиль щели без ограничения ее длины и глубины, включая операции подрезки и полной вырезки блоков из массива. ЭИ способ резания находит эффективное применение в таких процессах как:

- вырезка и обработка природного камня и искусственных материалов;
- проходка отрезных щелей и непосредственная вырезка блоков породы из массива без применения взрывной отбойки;
- зачистка скальных оснований под сооружения при строительстве;
- проходка щелей для укладки кабелей различного назначения.

Характерными отличиями и закономерностями данного способа являются:

– энергозатраты и скорость резания зависят от шага перемещения электродной системы, оптимальное значение которого определяется длиной разрядного промежутка и энергией, запасаемой ГИН;

– производительность и скорость резания при заданном шаге определяются частотой следования импульсов и соответствующей скоростью перемещения электродной системы.

Традиционные технологии проходки щелей и траншей в горных породах и бетонах уступают ЭИ способу по производительности и себестоимости этих работ. Главными причинами этого являются быстрый износ рабочего инструмента и низкий КПД. Характеристики традиционных механических способов резания горных пород и ЭИ способа представлены в таблице 2 (для песчаника).

Таблица 2 – Сравнительные характеристики ЭИ и традиционных способов резания

Способ резания	ω_s кВт/м ²	P, м ² /ч	B, мм
Тросовая пила	4,6	3,0	8-11
Маятниковая пила	5,2	2,4	6-10
Цепная пила	2,6	10	<42
Дисковая пила	4,4	1,0	3-5
Электроимпульсное резание	3,5–4,5	1,2–2,5	10–50

ω_s – энергозатраты на единицу вновь образованной поверхности; P – производительность образования новой поверхности; B – ширина щели

1.3.3 Дробление

Существует 5 основных классов устройств для дробления и измельчения, основанных на механических способах воздействия:

- щековые или челюстные дробилки;
- конусные дробилки;
- валковые дробилки;

- молотковые дробилки и дезинтеграторы;
- барабанные мельницы.

Достоинством дробильных установок, основанных на механическом воздействии, является высокая производительность. Например, конусная дробилка фирмы Traulog имеет производительность 2300 т/ч [41]. Дробилка предназначена для первичного дробления гранита до размеров 15-20 мм, который используется в качестве заполнителя.

Способы и устройства дробления, применяемые на карьерах разнообразны – дробильные машины, пневматические молотки, перфораторы, гидравлические прессы, копры (разрушение падающим грузом) [37, 40]. Однако, все эти способы и устройства отличаются сложностью конструкции, большим износом рабочих частей, высокими энергетическими затратами.

ЭИ способ дробления и измельчения твердых материалов является привлекательным благодаря присущим ему преимуществам:

- селективность дробления и измельчения неоднородных по структуре материалов;
- скорость и энергоемкость разрушения зависят от электрофизических и упругих свойств материалов и мало зависят от их твердости и абразивных свойств;
- возможность регулировки основных технологических параметров в широком диапазоне;
- энергозатраты при дроблении материалов ЭИ способом сопоставимы с механическими способами дробления.

Важно отметить, что основными конкурентоспособными факторами ЭИ способа с механическими являются:

- сопоставимая энергоэффективность с механическими способами;
- разрушение бетона в технической воде одновременно обеспечивает отмывание от глинистых частиц и цементного камня;
- при разрушении бетона высокая вероятность выхода фракций, соответствующих размерам исходных частиц заполнителя;

- энергозатраты на дробление бетона при использовании плоских сит-классификаторов составляют 15–30 кВт·ч/т, а параболических сит-классификаторов – 3 – 5 Вт·ч/т;
- щебень из дробленого бетона можно использовать повторно.

1.3.4 Электроимпульсное разрушение бетона и железобетона

С увеличением объемов производства бетона и железобетона происходит накопление отходов строительного производства. Источниками таких отходов являются железобетонные изделия (ЖБИ) сносимых, разбираемых или реконструируемых зданий и сооружений и автодорожных покрытий, разрушенных землетрясениями, оползнями и другими природными явлениями, которые нуждаются в переработке.

В России и за рубежом технология разрушения ЖБИ в основном базируется на использовании дробильно-сортировочного оборудования, используемого при переработке камня. Однако, наличие арматуры в ЖБИ повышает требования к установкам и обуславливает ряд их недостатков:

- большая металлоемкость;
- значительные габариты;
- низкий КПД;
- наличие пыли при работе установки;
- плохое качество дробленого бетона из-за наличия остатков арматуры;
- дополнительные затраты на измельчение и резку арматуры.

Дробилки роторно-молотковых и щековых типов для дробления ЖБИ имеют ограничение по длине 2-3 м и ширине 1 м [42], в связи с чем требуется предварительная подготовка крупногабаритных ЖБИ до допустимых размеров.

ЭИ технология может быть построена как безотходная, причем арматура для изделий может использоваться повторно. Сложность способа заключается в том, что ЖБИ являются многокомпонентными материалами, отличающимися в

зависимости от типа изделия степенью насыщения арматурой и содержанием заполнителя различного фракционного состава. Это требует знания технико-экономических показателей переработки конкретных типов изделий, поиска оптимальных режимов разрушения для извлечения заполнителя из бетона с целью повторного применения.

Степень освобождения арматуры в изделиях с двухслойным армированием составляет 90–95 %, в изделиях с однослойным армированием – 100 %. Как уже отмечалось, каркас после незначительной правки пригоден к повторному использованию в ЖБИ. Основным фактором, определяющим удельные затраты (и производительность установки), является степень насыщенности изделий арматурой. Так, для изделий с однослойной арматурой в виде сетки $W_{уд} = 2 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$, а для изделий с объемным двухслойным каркасом – $W_{уд} = 8 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$.

Следует отметить, что на базе разработок НИИ ВН (г. Томск) с участием НИИ ЖБ (г. Москва) разработаны опытные образцы установок для разрушения некондиционного железобетона, созданы макетные образцы стационарной и передвижной установок [43, 44].

1.3.5 Другие применения ЭИ способа разрушения

ЭИ способ разрушения может найти применение и в менее популярных сферах, таких как:

– селективная дезинтеграция руд. Обеспечивает лучшее раскрытие зерен минералов при высокой сохранности их природной формы и при более меньшей степени измельчения материала. При разрушении монокристаллических образований обеспечивается максимальный выход бездефектных монообластей кристаллов. Технологическая эффективность способа подтверждена при измельчении руд цветных и редких металлов, слюдяных и асбестовых руд, при выделении различного ограночного кристалл сырья из продуктивных пород.

– размерная обработка массива и блоков. Осуществимы операции выравнивания скального массива, проходки различного вида выемок, отверстий и т.п. Перспективные объекты использования: строительные площадки в городской черте с ограничениями на проведение взрывных работ, гидротехнические сооружения, включая подводные работы на скальном основании, объекты на дне моря.

– специальное измельчение материалов. Гарантируется минимальный привнос аппаратурного металла в продукт измельчения независимо от его абразивных свойств в сочетании с высокой селективностью.

1.4 Пробой различных сред на импульсном напряжении

Приложенное к диэлектрику слабое электрическое поле вызывает в нем процессы, связанные с перемещением заряженных частиц, которые не приводят к его разрушению. А если к диэлектрику приложено гораздо более сильное электрическое поле, это обычно приводит к разрушению диэлектрика. Процессы в слабых и сильных электрических полях несколько отличаются. Для последних характерно наличие высокой кинетической энергии заряженных частиц, приобретаемой ими при движении в электрическом поле, которая становится сопоставимой с энергией возбуждения атомов и молекул и энергией их ионизации [45].

В большинстве случаев очень сильное электрическое поле вызывает резкое увеличение электропроводности, что приводит к потере электроизоляционных свойств диэлектрика – пробую. Согласно ГОСТ 21515–76, пробой – это явление образования в диэлектрике проводящего канала под действием электрического поля. Минимальное электрическое напряжение, приложенное к диэлектрику, приводящее к пробую, называется пробивным и обозначается $U_{пр}$. Соответствующая минимальная напряженность однородного электрического поля, приводящая к пробую диэлектрика, называется электрической прочностью

(пробивной напряженностью). В однородном электрическом поле она равна: $E_{пр} = U_{пр}/d$ (где d – толщина диэлектрика). В случае неоднородного электрического поля величина $E_{пр.ср.} = U_{пр}/d$ называется средней пробивной напряженностью [45].

1.4.1 Пробой газов

Газовый разряд представляет собой плазму, в которой протекают процессы столкновения атомных частиц при их движении в электрическом поле, переход их в возбужденное состояние, процессы ионизации, рекомбинации, диффузии и др. Часто такую плазму называют столкновительной, в силу доминирующей роли процессов столкновения атомных частиц при развитии ионизационных явлений. Известно два механизма пробоя газов: лавинный и лавинно-стримерный.

При лавинном механизме ударная ионизация электронами сопровождается вторичными процессами на катоде, в результате которых заряды в газовом промежутке восполняются. Для пробоя газа в этом случае требуется образование серии лавин, причем каждая вновь образующаяся лавина по сравнению с предыдущей должна содержать большее число электронов, - тогда происходит «раскачивание» электронных лавин.

При лавинно-стримерном механизме на развитие пробоя существенно влияет совместное действие поля пространственного заряда лавины и фотоионизации в объеме газа. Благодаря этим вторичным процессам электронная лавина создает повышенную концентрацию носителей заряда, которая достаточна для непосредственного преобразования ее в стример - канал с повышенной проводимостью газа. Стример представляет собой скопление ионизированных частиц, сильно превосходящее лавину по степени ионизации. После распространения стримеров (отрицательного и положительного) на весь межэлектродный промежуток происходит пробой газа.

1.4.2 Пробой жидких сред

Изначально механизм электрического пробоя жидкостей считался идентичным механизму пробоя газов, принимая жидкость плотным газом из-за схожести картины разряда и разрядных зависимостей. Однако прямое, непосредственное применение газовых аналогий неверно, поскольку поведение электронов в жидкости кардинально отличается от поведения электронов в газе.

Пробой жидких диэлектриков до сих пор является недостаточно изученным явлением по ряду причин. Жидкости являются конденсированными средами и имеют сложную, не изученную до конца структуру. Из-за постоянного движения молекул возможно представить лишь среднестатистическую картину структурного строения, т.к. в каждый конкретный момент времени оно будет отличаться. Кроме этого, картина электропроводности усложняется рядом факторов. Например, в жидкостях могут присутствовать различные примеси, которые в свою очередь оказывают влияние на характер пробоя. Также, при приложении напряжения к электродам, находящаяся между ними жидкость, вследствие движения частиц может перемешиваться т.е. состав жидкости между электродами может обновляться. Наконец, за счет протекающего тока в жидкости может происходить вскипание с образованием газовых пузырьков, также влияющих на пробой жидкости. Совокупность перечисленных факторов весьма трудно учитывать и контролировать, чем и объясняется отсутствие ясных представлений картины пробоя жидкостей. В настоящее время принято подразделять жидкие диэлектрики на две подгруппы: жидкости технической очистки и жидкости высокой степени очистки [45]. Изучение пробоя таких жидкостей имеет не только практическое, но и научное значение.

Существуют гипотезы о двух основных механизмах пробоя жидкостей – пузырьковом и ионизационном. В пузырьковой модели основным источником носителей заряда, создающим плазменный разрядный канал, являются ионизационные процессы, развивающиеся в газовых пузырьках, которые

существовали в жидкости или образовались в ней при приложении сильного электрического поля. Вторая модель гласит, что плазма на начальных фазах развития канала создается в результате ударной или автоионизации в жидкости. В результате образующихся при этом носителей заряда движущихся в поле происходит разогрев и вскипание жидкости, что приводит к формированию газовых каналов. В них может развиваться ионизация по законам газового разряда, преобразовывая их в высокопроводящие каналы [46].

Накопленный к настоящему времени большой экспериментальный материал по электрическому пробое жидкостей подтверждает высказывания о том, что существует несколько различных механизмов пробоя, описать которые единой теорией невозможно.

1.4.3 Пробой твердых диэлектриков

Большой научный интерес и важное прикладное значение имеет вопрос о пробое твердых диэлектриков (ТД), т. к. любая электроизоляционная конструкция изготавливается с их применением. Отличием пробоя газов и жидкостей от пробоя ТД является образование в нем сквозного канала пробоя, который является результатом механического разрушения диэлектрика.

Электрическая прочность и механизм пробоя ТД также зависят от множества факторов и их совокупности. К таким факторам относятся: температура окружающей среды, форма приложенного напряжения, длительность его воздействия, вид самого диэлектрика, особенности его структуры, площадь электродов, степень однородности электрического поля и др. Даже в одном и том же ТД при различных условиях (температура, конфигурация электрического поля, условия теплоотвода и др.) могут развиваться различные формы пробоя.

В настоящее время принято выделять три основные формы пробоя ТД: 1 – электрический, 2 – тепловой, 3 – электрохимический. Развитие той или иной формы пробоя ТД определяется преобладающим влиянием электрических,

тепловых, электрохимических или иных явлений, возникающих в процессе развития пробоя.

Для электрического пробоя характерна кристаллографическая направленность канала пробоя, практическая независимость электрической прочности от температуры и толщины диэлектрика. Для теплового и электрохимического пробоя характерно резкое снижение электрической прочности с ростом температуры и толщины диэлектрика, а также с увеличением времени приложения напряжения [45].

1.5 Гипотезы механизма внедрения канала разряда в твердый диэлектрик

В данной работе главный интерес представляет пробой разных диэлектрических сред при воздействии импульсного напряжения субмикросекундной длительности, как показано на рисунке 1 слева от точки A_k . При этом принципиально изменяются механизмы пробоя как жидкого диэлектрика, так и твердого: происходит пробой, внедрение канала разряда в твердый диэлектрик в среде жидкого до воды включительно.

На сегодняшний день написано большое количество работ по пробоям твердых и жидких диэлектриков на импульсном напряжении [17, 18, 35, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54]. Описаны основные закономерности и механизмы пробоя твердых [47, 49, 51, 54] и жидких [46, 52, 55, 56] диэлектриков в зависимости от различных факторов. Тем не менее, до сих пор отсутствует ясное понимание механизма пробоя твердого диэлектрика в жидкой среде. Существует основные три гипотезы, объясняющие механизм внедрения [35, 57, 58, 59, 60, 61, 62].

За основу гипотезы автора [58] взяты идеи о микровзрывах на поверхности электродов и эктонных процессов [59, 63]. Большая концентрация энергии в микрообъеме катода происходит за счет джоулева разогрева микровыступов на катоде током автоэлектронной эмиссии при разрядах в вакууме. Данная гипотеза носит феноменологический характер и имеет некоторые недостатки. Например,

имеются противоречия экспериментальным результатам касаясь влияния диэлектрической проницаемости и высоты подъема электрода над поверхностью твердого диэлектрика [49] на эффективность разрушения, пробой на положительной полярности потенциального электрода в резконеоднородных полях, образование «запрещенной зоны» вокруг электродов и др.

Объяснение другой гипотезы [60, 61, 62] о внедрении канала разряда в горную породу основано на гипотезе Л.А. Юткина [64]. Этот подход заключается в описании процесса разрушения как последовательности частичных разрядов в газовых включениях, которые имеют место в любой природной породе, а также во многих искусственных твердых материалах. Таким образом, по мнению авторов главным критерием пробоя и разрушения твердых неоднородных диэлектриков (горных пород) является наличие газовых полостей и твердых включений с низким пробивным напряжением, а также неоднородность пород.

Однако, данный подход также имеет противоречия экспериментальным данным некоторых авторов по пробоям образцов органических и неорганических материалов (полиэтилен, полиметилметакрилат, щелочногаллоидные кристаллы и др.) [13, 35, 65, 66], которые не имеют пор, а коэффициент водопоглощения близок к нулю.

Согласно третьей гипотезе, одним из основных факторов, влияющих на развитие канала пробоя в ТД, рассматривается объемный заряд (ОЗ), накапливающийся в жидкости вблизи стержневых электродов. Объемный заряд, в первую очередь, приводит к выравниванию электрического поля в жидкости. Этот процесс сильно зависит от напряженности электрического поля на электроде (острийном) и времени воздействия напряжения. При некотором значении времени приложения напряжения, заряженные частицы не успевают покинуть зону ионизации вблизи острия в результате чего происходит накопление объемного заряда в жидкости, что приводит к уменьшению напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке между границей ОЗ и противоположным электродом. Эта идея подтверждается в некоторых работах посвященных процессу

пробоя жидких диэлектриков [46, 52, 55]. Также установлено, что процесс зарождения канала разряда всегда сопровождается возникновением сферического образования вблизи электрода (острийного) в котором число заряженных частиц достигает 10^{14} – 10^{16} 1/см³ [52], что для продвижения канала к противоположному электроду требуется значительно увеличить воздействующее напряжение – напряженность на поверхности объемного заряда. При указанных выше временах воздействие напряжения, этой напряженности оказывается достаточно для зажигания и развития канала разряда в твердом диэлектрике до завершения, раньше, чем произойдет пробой жидкости, поскольку скорость развития разряда в твердом теле в 5-10 раз выше, чем в жидкости.

Данная гипотеза подтверждается рядом экспериментальных результатов: наличие «запрещенной зоны», динамика скорости развития разряда при пробое, изменение ВСХ жидких и твердых диэлектриков и считается наиболее приемлемой для исследований в данной диссертационной работе.

1.6 Проблемы, стоящие перед ЭИ технологиями

Как отмечалось ранее, опытная эксплуатация установок, работающих на новых принципах, позволила доказать ее преимущество по многим показателям, но вместе с этим выявила и ряд проблем с ее доведением до полупромышленного образца и, тем более, с организацией ее массового производства. К наиболее важным проблемам, которые необходимо решать относятся:

– изоляция - необходимость передачи высокого импульсного напряжения от ГИН к буровому наконечнику и отсутствие в промышленности необходимых высоковольтных электроизоляционных устройств требует выбора электроизоляционного материала, разработки электроизоляционных изделий (изоляторов) и их исследования при многоимпульсном воздействии напряжения;

– амплитуда напряжения - высокие амплитуды импульсного напряжения затрудняют создание промышленных установок для электроимпульсных технологий;

– рабочая среда - поиск рабочей и промывочной жидкости с целью замены углеводородов (трансформаторного и солярового масел). В современном мире особое внимание уделяется экологическому вопросу, соответственно необходимо переходить на буровые жидкости с водной основой;

– малый ресурс применяемых источников высоковольтных импульсов;

– область применения - поиск наиболее эффективных областей применения ЭИ технологий бурения, резания, дробления, утилизации;

– шум – высокий уровень акустических шумов, электромагнитных излучений и наводок усложняют технологические установки и требуют дополнительных средств для ограничения негативных воздействий;

– стоимость – в случае ЭИ бурения, по предварительным оценкам, для создания первого образца демонстрационной установки, которая сможет пробурить 1 км необходимо 20 млн долларов, а коммерческий прототип, который сможет пробурить порядка 8 км – 200 млн долларов.

1.6.1 Изоляция

Одним из наиважнейших элементов, который определяет срок службы и надежность работы всех высоковольтных устройств является изоляция. С непрерывным развитием технологий возрастают требования к надежности изоляции высоковольтных электрофизических устройств. В качестве твердой изоляции используются диэлектрики более 400 видов, различающихся по электрофизическим характеристикам. С появлением ЭИ технологий возникли новые специфические требования к изоляции при длительной работе на импульсном напряжении. Основными требованиями к высоковольтной изоляции ЭИ установок, в частности в технологии ЭИ бурения, являются:

- надежная работа при большом количестве импульсов напряжения (до 10^9 импульсов) и высоких рабочих градиентах электрического поля (до 20 кВ/мм);
- стойкость к агрессивным условиям окружающей среды и высокой скорости движения промывочной жидкости;
- устойчивость к механическим воздействиям, возникающих в процессе бурения (перемещение бурового снаряда и гидроудар при пробое жидкости).

В условиях длительного воздействия электрического поля постепенно ухудшаются электрофизические характеристики диэлектрических материалов. Происходит их старение, которое приводит к пробое. Старение обусловлено развитием целого ряда таких процессов как:

- накопление ОЗ;
- ионизационные процессы в газовых включениях;
- зарождение, развитие микротрещин;
- химические превращения;
- изменение электропроводности и др.

Все эти процессы носят локальный характер, а интенсивность этих процессов непрерывно изменяется во времени и зависит от величины приложенного электрического поля. Поэтому, в настоящее время теоретическое описание этого сложного и многофакторного процесса является чрезвычайно трудной задачей, а основным методом определения электрической прочности изоляционных материалов как при длительном воздействии напряжения, так и при кратковременном остается экспериментальный.

В настоящее время основная роль в сокращении срока службы изоляции отводится следующим процессам:

- частичные разряды (ЧР) внутри и на поверхности диэлектриков. ЧР являются одним из основных факторов, определяющих процесс старения неоднородной изоляции [67, 68, 69], которые обычно не приводят к сквозному пробое диэлектриков, а вызывают местное разрушение. Наибольшую опасность ЧР представляют для многослойной, пленочной изоляции.

– развитие дендритов. Дендриты также являются причиной повреждения изоляционного материала при воздействии электрического поля [69, 70, 71, 72, 73] и представляют собой образование древовидных каналов пробоя. Появление самого дендрита является следствием целого ряда предшествующих процессов [74].

– пондеромоторные силы, возникающие в электрическом поле, могут быть причиной разрушения твердых диэлектриков [75, 76, 77]. Экспериментальное подтверждение данного факта имеет место в работах А.А. Воробьева и Г.А. Воробьева [51, 75, 78, 79].

– электрохимические процессы в объеме и на поверхности диэлектрика. Известно, что при длительном воздействии электрического поля на диэлектрик в нем протекают электрохимические реакции, в результате которых появляются свободные радикалы, новые концевые радикалы и т.д. [80]. Эти процессы могут являться дополнительными источниками носителей заряда, т.е. очагами разрушения диэлектрика [81].

– накопление ОЗ является одним из первичных процессов, прямо или косвенно влияющих на старение диэлектриков при приложении электрического поля [82]. Более того, приведенные выше возможные причины старения диэлектриков так или иначе связаны с процессом накопления ОЗ.

Например, при исследовании ЧР была показана важная роль накопления ОЗ в массиве материала или на поверхности газовых полостей в объеме [83, 84]. В [71, 85] отмечается, что перед появлением дендрита происходит накопление ОЗ и изменение поля в локальном объеме, из которого и начинается развитие дендрита. При рассмотрении вопроса влияния пондеромоторных сил на разрушение диэлектрика, в [51] отмечается что ОЗ может приводить к увеличению пондеромоторных сил за счет локального усиления поля [86]. Тем не менее, несмотря на огромное количество работ по пробое диэлектриков [87, 88, 89, 90, 91, 92] концепция о важной роли ОЗ в этих процессах остается на уровне гипотезы по сей день.

Также, к влияющим и усиливающим действие электрического поля относятся повышенная температура и другие косвенные факторы, особенно для изоляции ЭИ устройств.

1.6.2 Рабочие жидкости

Применительно к ЭИ технологии разрушения твердых тел наличие жидкой среды является принципиальной необходимостью. Изучение электрофизических свойств жидкостей и их влияние на процесс внедрения разряда в твердый диэлектрик позволяет выбрать те из них, которые наиболее полно удовлетворяют технологическим требованиям. Как было отмечено выше, имеется большое количество работ, изучающих поведение различных жидкостей при воздействии импульсных напряжений. Развитие разряда в жидкости является первой стадией сложного технологического процесса, а сама жидкость играет роль изолирующей и рабочей среды. При этом характеристики импульсного пробоя оказывают влияние на последующее энерговыделение в канале разряда и на процесс формирования различного рода импульсных возмущений, используемых в технологиях. Высокие значения параметров импульсов напряжения предъявляют ряд жестких требований к окружающей среде [41]. Требования к жидкой изоляции можно сформулировать следующим образом:

- высокая электрическая прочность;
- малая активная проводимость;
- слабое разложение под действием электрических разрядов;
- быстрое восстановление диэлектрических свойств после пробоя.

Накопленный к настоящему времени опыт применения в ЭИ технологиях в качестве изоляции различных жидкостей показывает, что указанным выше требованиям отвечают диэлектрические жидкости (трансформаторное, соляровое масла и др.), вода и специальные промывочные жидкости.

На сегодняшний день в мире разработаны экологически чистые электроизоляционные жидкости, а также буровые растворы на нефтяной основе для бурения нефтяных и газовых скважин:

- трансформаторная жидкость Midel 7131;
- буровые растворы на масляной основе Versa Pro и Versa Clean;
- известково-битумный раствор (ИБР)

В таблице 3 приведены основные электрофизические характеристики перечисленных жидкостей, а также трансформаторного масла и воды, поскольку данные жидкости тоже имеют применение в ЭИ технологиях.

Таблица 3 – Основные электрофизические характеристики рабочих жидкостей

Жидкость	Midel	Versa Pro	Versa Clean	Водопроводная вода	Трансформаторное масло	Известково-битумный раствор
$E_{пр}$, кВ/см	135	115,0	139,5	78	110	95
ρ , Ом·см	$5 \cdot 10^{12}$	$2,9 \cdot 10^8$	$4,7 \cdot 10^8$	$(4-5) \cdot 10^3$	10^{12}	$6 \cdot 10^9$
ε	3,2	8,3	7,2	81	2,2	3,8
$t_{пр}$, мкс	0,3	0,35	0,36	0,4	0,3	0,3
ρ_0 , г/см ³	0,97	1,12	1,16	1,0	0,88	1,15
U_0 , кВ	62	11	12	0	40	34

где: ρ – удельное объемное сопротивление; ε – относительная диэлектрическая проницаемость; ρ_0 – удельный вес; $E_{пр}$ – средняя импульсная пробивная напряженность для исходных жидкостей $E_{пр} = U/S$; $t_{пр}$ – время до пробоя; U_0 – пробивное напряжение в стандартном разряднике на переменном напряжении 50 Гц.

Все жидкости имеют достаточно высокую электрическую прочность при примерно одинаковом времени до пробоя, но существенно различаются по удельному сопротивлению.

Трансформаторная жидкость Midel используется в качестве альтернативы минеральным маслам в трансформаторах и других высоковольтных устройствах.

За счет своей быстрой биodeградации она практически безопасна для окружающей среды. При этом, как видно из таблицы 3, по комплексу характеристик данная жидкость не уступает трансформаторному маслу.

Стоит отметить, что в НИИ ВН с участием ВНИИ имени И.М. Губкина разработаны рецептуры различных растворов с использованием нефтяной, масляной основы и воды, применение которых лишь незначительно снижает показатели ЭИ бурения по сравнению с бурением в дизельном топливе [93].

Использование воды в качестве рабочей среды ограничивается высокой электрической проводимостью и диэлектрической проницаемостью, вследствие чего возникает необходимость в импульсах большей амплитуды и с большей крутизной фронта, что повышает требования к источнику импульсов и к изоляционным конструкциям бурового снаряда. Встающие при применении воды технические проблемы обеспечения надежности работы буровых снарядов требуют дальнейшего изучения. Поэтому, несмотря на технологические преимущества рабочих жидкостей на нефтяной основе, предпочтение в исследованиях отдается воде в силу ее экологичности, что является важным аспектом в современном мире.

1.7 Влияние полярности на механизм внедрения

Немаловажным фактором при осуществлении внедрения канала разряда в твердое тело является полярность высоковольтного импульса напряжения в межэлектродном промежутке, от которого зависит пробивное напряжение газообразных, жидких и твердых диэлектриков [14, 18, 22, 31, 35, 46, 49, 50, 51, 53, 54]. Однако результаты исследований данного эффекта различными авторами носят противоречивый и дискуссионный характер [12, 16, 94, 95, 96]. Так, для горных пород при импульсном пробое во временном диапазоне $2 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-6}$ с в резко неоднородном поле типа «стержень – плоскость» эффекта полярности не обнаружено [22]. По данным автора [12] пробивные напряжения кварцита и

фельзит-порфира толщиной 10 мм в системе электродов «стержень-плоскость» на импульсах отрицательной полярности превышают пробивные напряжения этих пород на импульсах положительной полярности на 10-20%. В [96] при пробое органического стекла толщиной 2 мм в системе электродов «стержень – плоскость» на импульсах с длиной фронта 10 мкс влияние полярности на величину пробивного напряжения не обнаружено, а при длине фронта 1 мкс отношение $U_{пр}^- / U_{пр}^+$ равно 135%. В [94] при пробое образцов мрамора, глинистого сланца и песчаника толщиной 10 мм в резко неоднородном электрическом поле эффекта полярности не обнаружено. В [16] были выполнены исследования по эффективности разрушения твердых тел на образцах из органического стекла. В [18] приведены вольт-секундные характеристики кварцевого порфира, гранита и щелочного гранита, полученные в системе электродов «стержень – плоскость» при положительной и отрицательной полярности импульса воздействующего напряжения. Установлено, что при импульсном пробое кварцевого порфира, гранита и щелочного гранита в резко неоднородном поле электродов «стержень-плоскость» на импульсах положительной и отрицательной полярности эффекта полярности импульса не обнаружено. Тем не менее, принято считать, что для многих диэлектриков при воздействии напряжений положительной полярности пробивное напряжение ниже, чем при отрицательной полярности, особенно данный эффект в основном характерен для полярных диэлектриков. Для жидких диэлектриков различие в величинах пробивного напряжения при положительной и отрицательной полярностях в резко неоднородном поле лежит в широком диапазоне [6].

На рисунке 4 представлены стилизованные схемы развития канала разряда при положительной и отрицательной полярности импульса воздействующего напряжения, где видно, что для отрицательной полярности импульса напряжения эффективность разрушения гораздо ниже, чем для положительной, поскольку часть промежутка у отрицательного стержневого электрода обычно перекрыта по поверхности и не подвергается разрушению.

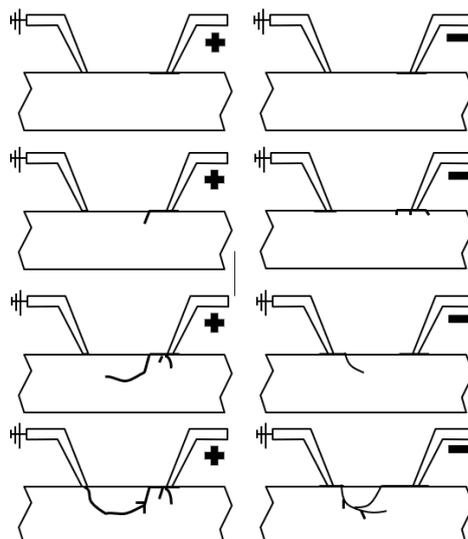


Рисунок 4 – Схемы развития процесса пробоя твердого тела (оргстекла) при положительной и отрицательной полярности импульса воздействующего напряжения

Как видно из рисунка 4, характер развития пробоя существенно зависит от полярности импульса напряжения, подаваемого на электродную систему. Основное различие связано с неодновременностью начала развития процесса $U_{пр}$ и соответственно с различной выраженностью «кистевых» разрядов у электродов разной полярности.

Существенное влияние на различие пробивных напряжений оказывают свойства рабочей жидкости. Наиболее ярко эффект полярности проявляется в жидкостях с высокой диэлектрической проницаемостью. Кроме этого, эффект полярности в жидких диэлектриках зависит от степени неоднородности электрического поля [6].

К настоящему времени проведено огромное количество исследований по ЭИ разрушению и бурению горных пород как при отрицательной полярности импульса напряжения (т. к. в этом случае пробивное напряжение жидкости, окружающей твердое тело, наибольшее), так и при положительной полярности импульса напряжения (т. к. в этом случае величина объема разрушения – объема откольной воронки, т.е. технологическая эффективность выше [18, 14, 48, 50, 66]). Однако

подобных исследований по одновременному воздействию импульсов высокого напряжения разной полярности (двуполярный импульс) на твердый диэлектрик (горную породу) не обнаружено.

Исследование влияния полярности импульса на пробивные напряжения горных пород имеет весьма важное значение с точки зрения выбора условий пробоя и разрушения породы при одновременном обеспечении надежной работы всех элементов породоразрушающего электроимпульсного устройства. Учитывая важность данного вопроса для ЭИ технологии и его дискуссионный характер в данной работе впервые проведены исследования по двуполярному способу разрушения.

1.8 Выводы и задачи исследования

К настоящему времени в электроразрядных технологиях назрела проблема повышения производительности процесса электроимпульсного откола материала от массива породы, которая может быть решена несколькими путями. Первый, очевидный путь, это повышение частоты следования импульсов, однако это предъявляет повышенные требования к генератору импульсов, а также ограничено физическими особенностями формирования канала пробоя под слоем жидкости. При высокой частоте следования импульсов, канал разряда имеет тенденцию формироваться по продуктам предыдущего разряда, что приводит к снижению производительности единичного импульса, это в итоге ограничивает верхний предел частоты следования импульсов. Второй путь, это увеличение межэлектродного расстояния, однако при этом увеличивается крупность шлама, что повышает требования к интенсивности промывки, а также требует увеличения рабочего напряжения, это в свою очередь отрицательно сказывается на стойкости изоляции всей системы. Третий путь, менее очевидный, это организации пробоя сразу в нескольких межэлектродных промежутках. Возможность осуществлять многоканальный пробой твердого диэлектрика под слоем жидкости, и

формировать откол материала сразу в нескольких межэлектродных промежутках может увеличить производительность разрушения горных пород за счет увеличения площади охвата и, соответственно, увеличения объема разупрочнения горных пород за один импульс напряжения.

ГЛАВА 2 МЕТОДИКА И СРЕДСТВА ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1 Экспериментальные образцы горных пород

В качестве горных пород выбраны песчаник (коэффициент крепости по шкале М.М. Протодяконова $f=6$) и гранит ($f=14$), как наиболее распространенные в природе [97, 117]. Образцы вырезались из моноблоков на камнерезном заводе в городе Камень-на-Оби. Размеры образцов песчаника составляли 150x100x50 мм (Рисунок 5), а гранита - 300x80x30 мм (Рисунок 6). Одна из плоских сторон каждого образца гранита была полированной, т.к. подготовленные таким образом образцы позволяют с наименьшими трудностями визуально определить наличие внедрения канала разряда.



Рисунок 5 – Внешний вид образца песчаника 150x100x50



Рисунок 6 – Внешний вид образцов гранита 300x80x30

В процессе испытаний измерялись: амплитуда импульсного напряжения U и ток I , параметры откольной воронки – максимальная глубина H , ширина B , длина L и объем разрушения V (там, где это возможно). Также, были рассчитаны:

– производительность разрушения:

$$Q = \frac{V}{n} \left[\frac{\text{см}^3}{\text{имп}} \right] \quad (2.1)$$

– средняя напряженность электрического поля:

$$E = \frac{U}{S} \left[\frac{\text{кВ}}{\text{см}} \right], \quad (2.2)$$

где, V – объем откольной воронки, n – количество импульсов U – приложенное к электродам напряжение, S – межэлектродное расстояние.

2.2 Установка для экспериментов с импульсами разной полярности

В опытах по разрушению горных пород импульсами разной полярности использовались два стержневых электрода диаметром 8 мм расположенных под углом друг к другу так, чтобы их рабочие концы оказывались на одной поверхности образцов горных пород (Рисунок 7). Каждый электрод подключался к отдельному ГИН при помощи изолированного провода. Расстояние между электродами изменялось в соответствии с планом эксперимента. Также исследовались пробивные напряжения воды. Пробой воздуха осуществлялся в слабонеоднородном поле между шаровыми разрядниками диаметром 12,5 мм. Количество пробоев для заданных условий не менее: для воды и воздуха 50 пробоев, для горных пород 30 пробоев. Ошибка измерений пробивных напряжений для горных пород не превышала 10%. Полиэтиленовый бак объемом 500 дм³ заполнялся водопроводной водой с удельным сопротивлением в исходном состоянии $\rho = (3,6 - 4,2) \cdot 10^3$ Ом·см, поскольку вода предпочтительна при ЭИ бурении, резании, дроблении, как рабочая жидкость. В процессе работы

производился контроль удельного сопротивления воды. При уменьшении $\rho < 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ объем воды в баке заменялся.

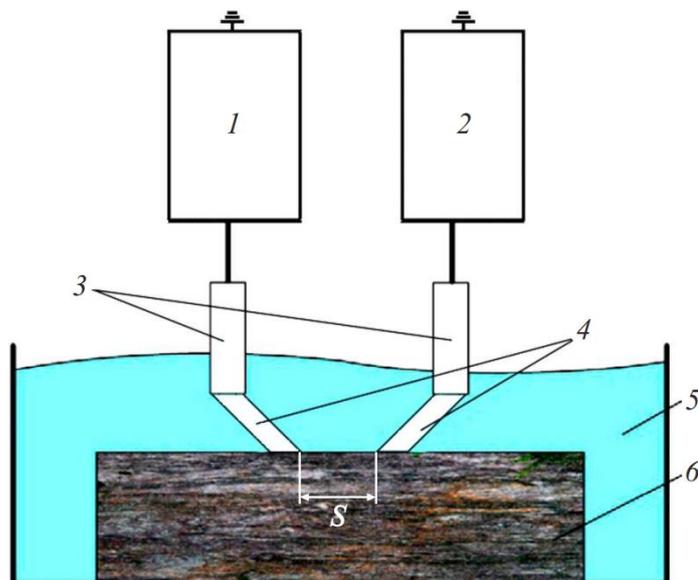


Рисунок 7 – Схема расположения электродной системы на образце: 1, 2 – генераторы импульсного напряжения, 3 – изоляция, 4 – электроды, 5 – жидкость, 6 – горная порода, S – расстояние между электродами

Непрерывным условием при сравнительных испытаниях является определение пробивных напряжений при одинаковых или близких временах до пробоя, т.к. ЭИ эффект осуществляется при временах воздействия напряжения в субмикросекундном диапазоне, где с уменьшением времени до пробоя возрастают пробивные напряжения для всех диэлектриков, но с различной скоростью [35].

В зависимости от электрической прочности диэлектрика и расстояния между электродами пробой может происходить на фронте, амплитуде и спаде импульса напряжения. При пробое на спаде пробивное напряжение определялось по амплитуде [98], а время до пробоя по осциллограмме тока, как наиболее точное (Рисунок 8).

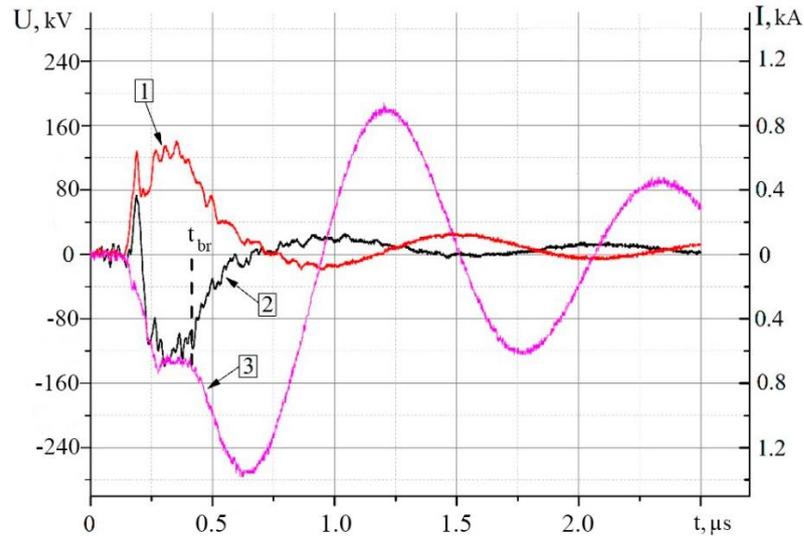


Рисунок 8 – Осциллограмма тока и напряжения: 1 – импульс напряжения положительной полярности, 2 – импульс напряжения отрицательной полярности, 3 – ток в контуре, $t_{бр}$ – время до пробоя

Для реализации условий электроимпульсного пробоя и разрушения твердых тел требуется источник с необходимыми временными и энергетическими параметрами. В качестве такового широкое применение нашли емкостные генераторы импульсных высоких напряжений по схеме Аркадьева - Маркса, которые применены в наших исследованиях (Рисунок 9, 10).

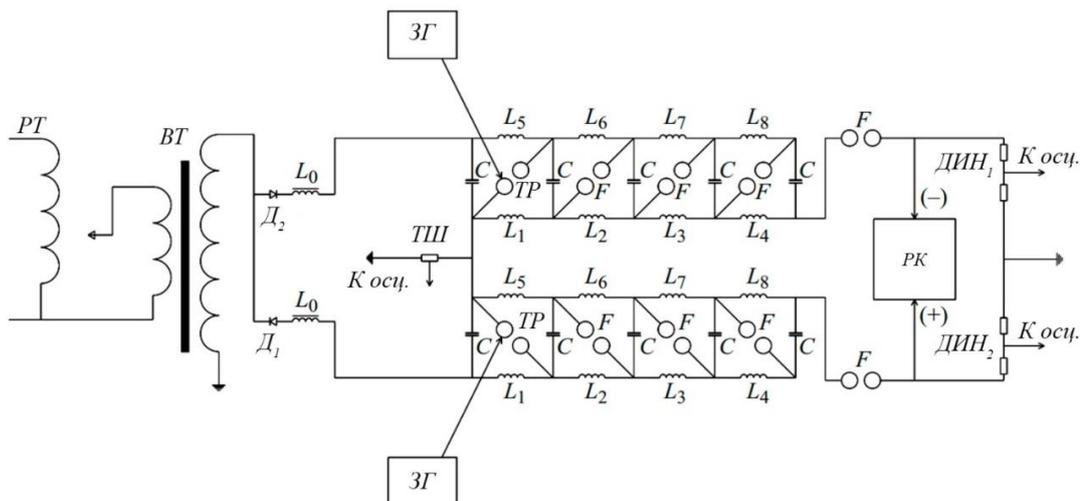


Рисунок 9 – Схема замещения испытательной установки

РТ – регулировочный трансформатор; ВТ – высоковольтный трансформатор; L_0 – зарядные дросселя; D_1, D_2 – выпрямители; С – емкость; $L_1 - L_8$ – индуктивности;

ТР – тригатрон; F – искровой промежуток; ДИН₁, ДИН₂ – делители напряжения;
ТШ – токовый шунт; РК – разрядная камера; ЗГ – запускающие генераторы.

На рисунке 9 приведена общая электрическая схема испытательной установки, которая состоит из блоков:

– зарядного высоковольтного устройства с элементами измерения высокого выпрямленного напряжения, защитными устройствами и пультом управления;

– двух генераторов высоковольтных импульсных напряжений с устройствами управляемого запуска на базе тригатронов;

– блоков измерения высоких импульсных напряжений при помощи малоиндуктивных омических делителей напряжения, токового шунта для измерения тока при пробое;

– испытательной ячейки из полиэтилена, заполненной водой с системой электродов, куда помещаются испытуемые образцы горных пород.

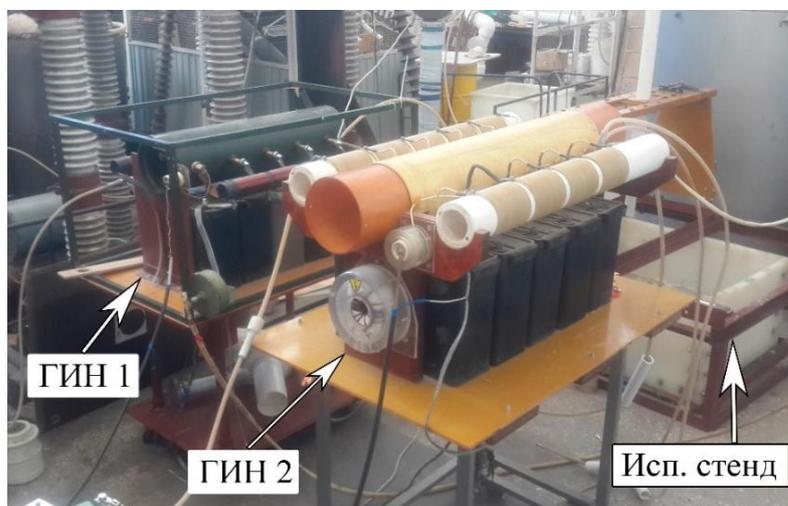


Рисунок 10 – Внешний вид ЭИ установки

Генераторы платформенного типа состоят из пяти ступеней. Каждая ступень снабжена конденсаторами типа ИК – 100/0.1. где 100 – номинальное рабочее напряжение (кВ), 0,1 – емкость (мкФ). Рабочее напряжение ГИН регулируется при помощи изменения расстояния между шаровыми разрядниками на каждой ступени.

Зарядное напряжение каждого ГИН не превышает 35 кВ. Из опытов холостого хода и короткого замыкания генераторов следует, что длительность фронта импульсов составляет $\tau_{\phi} = 0,2 \cdot 10^{-6}$ с., а волновое сопротивление $Z_{\text{в}} = 12,0$ Ом.

При подключении нагрузки в виде электродной системы в воде параметры импульса изменяются: длительность фронта увеличивается до $\tau_{\phi} = 0,24 \cdot 10^{-6}$ с., а длительность импульса и амплитуда напряжения уменьшаются вследствие большой емкости между электродами и малого удельного сопротивления воды.

Для синхронизации работы обоих генераторов применены схемы управления разрядниками тригatronного типа с регулируемым напряжением и временем срабатывания.

Блок измерения высокого напряжения состоит из двух малоиндуктивных омических делителей для одновременного измерения напряжений двух ГИН – положительной и отрицательной полярности. Ошибка измерения параметров импульса напряжения не более 3,1% [110]. Токовый шунт позволял измерять разрядные токи амплитудой не менее 20 кА.

2.3 Установка для экспериментов по организации многоканального пробоя горных пород

В экспериментальных исследованиях по многоканальному электрическому пробую в качестве источника импульсов был использован генератор EG-350 (Рисунок 11, 12), который в отличие от используемых нами генераторов Аркадьева-Маркса, обеспечивает большее выходное напряжение ≥ 350 кВ. Запасенная энергия генератора ~ 600 Дж. Импульсный генератор EG-350 на основе импульсного трансформатора изначально предназначен для разрушения железобетонных изделий, горных пород и является более подходящим для проведения экспериментов в условиях однополярного импульса напряжения с межэлектродным расстоянием ~ 45 мм. Генератор включает в себя высоковольтный

модуль и источник питания. Основные технические характеристики генератора EG-350 представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Основные технические характеристики генератора EG-350

Высоковольтный модуль	Емкость накопителя, мкФ	1,05
	Зарядное напряжение, кВ	35
	Время зарядки, мкс	100
	Запасенная энергия, Дж	600
	Выходное напряжение, кВ	350

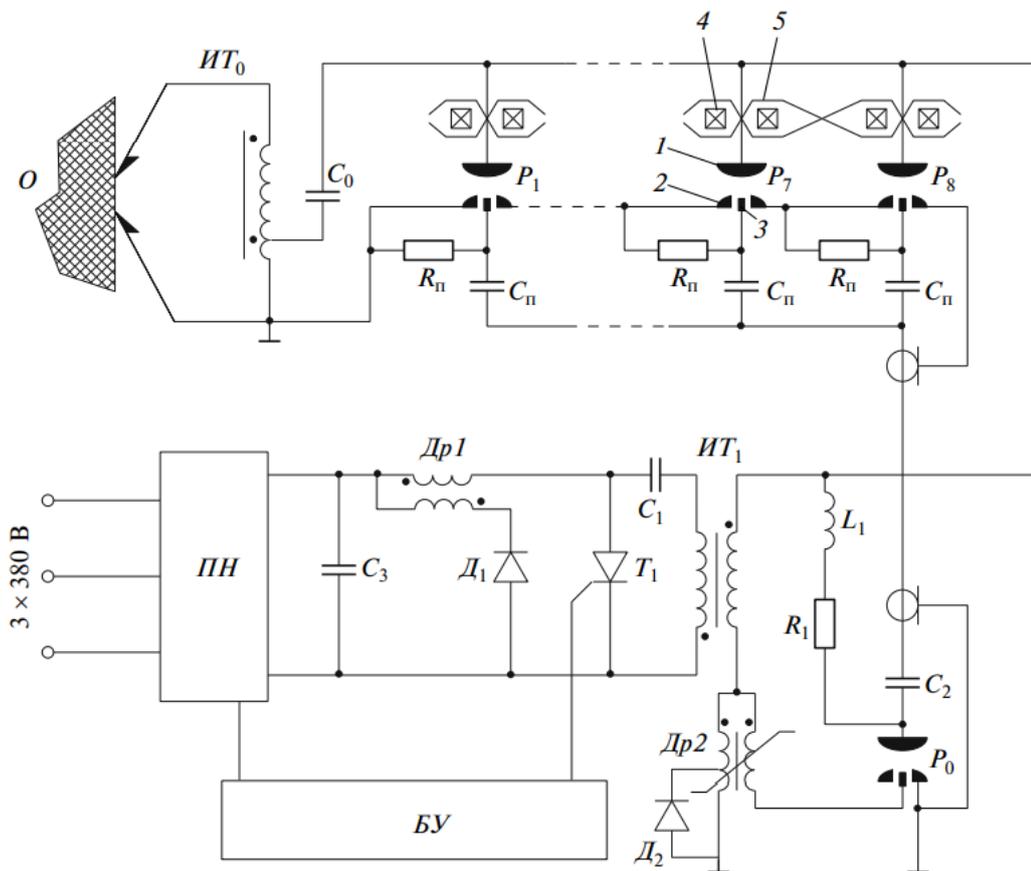


Рисунок 11 – Электрическая схема генератора

$ПН$ – преобразователь напряжения, $БУ$ – блок управления; 1 – анод, 2 – заземленный электрод, 3 – пусковой электрод, 4 – сердечник анодного делителя тока, 5 – виток, O – разрушаемый объект; T_1 – ТБИ353-800-34 кл, D_1 – Д123-250-360 кл, D_2 – ВЛ25-10 кл; P_0 – стартовый разрядник; P_1 - P_8 – многоканальный разрядник; $ИТ_1$ – импульсный трансформатор (сердечник из пермалля 50НП, $S =$

35 см², первичная обмотка 11 витков медной лентой, вторичная – 200 витков проводом \varnothing 1 мм), ИТ₀ – высоковольтный импульсный трансформатор; Др1 – дроссель рекуперации энергии, Др2 – дроссель насыщения (сердечник из пермаллоя 50НП, первичная обмотка 8 витков, вторичная – 10 витков); L₁ – 57 мкГн; С₀ – 1 мкФ (К75-74-40 кВ: 0.1 мкФ – 8 шт. и 0.047 мкФ – 4 шт., соединенных параллельно), С1 – 320 мкФ (К75-83Б-3000 В-20 мкФ – 16 шт. параллельно), С₂, С_п – К15-4-470 пФ, С₃ – К75-92-2500 В-20 мкФ; R₁ – ТВО-5-30 кОм, R_п – ТВО-2-130 кОм.



Рисунок 12 – Внешний вид импульсного генератора EG-350

Генератор состоит из высоковольтного модуля и источника питания. Высоковольтный модуль состоит из семи основных блоков:

- высоковольтный изолятор. Предназначен для вывода высокого напряжения к системе электродов и разделяет масляный объем модуля от рабочей жидкости.

- повышающий импульсный трансформатор. Выполнен на основе ферромагнитного сердечника. Обеспечивает минимальную индуктивность рассеивания импульсного трансформатора.

- емкостной накопитель. Собран из конденсаторов серии К75-74 двух номиналов (0.1 мкФ – 8 штук, 0.047 мкФ – 4 штуки) с рабочим напряжением 40 кВ и суммарной емкостью 1 мкФ.

- коммутатор. Содержит восемь искровых промежутков тригatronного типа.
- блок запуска коммутатора. Представляет собой электрическую цепь, обеспечивающую инициирование пробоя во всех искровых промежутках коммутатора высоковольтного модуля.

Все эти блоки размещены в одном цилиндрическом корпусе. Электропитание и управление высоковольтным модулем осуществляется от источника питания с помощью высоковольтного и управляющего кабелей.

Источник питания импульсного генератора EG-350 предназначен для зарядки емкостного накопителя высоковольтного модуля. Источник питания выполнен отдельным блоком, в котором размещен источник постоянного тока ИПТЭГ – 8 – 2000, входной трехфазный автомат, контактор, высоковольтный импульсный трансформатор, емкостной накопитель, схема рекуперации энергии, а также органы управления и регулировки.

Система позиционирования позволяет дистанционно перемещать генератор в трех осях и представляет собой металлический каркас, снабженный шарико-винтовой передачей (ШВП). Движение задается с помощью шаговых двигателей (ШД). Управление перемещением осуществляется с помощью драйвера шаговых двигателей и компьютера. Внешний вид системы позиционирования и ее модели представлены на рисунке 13.

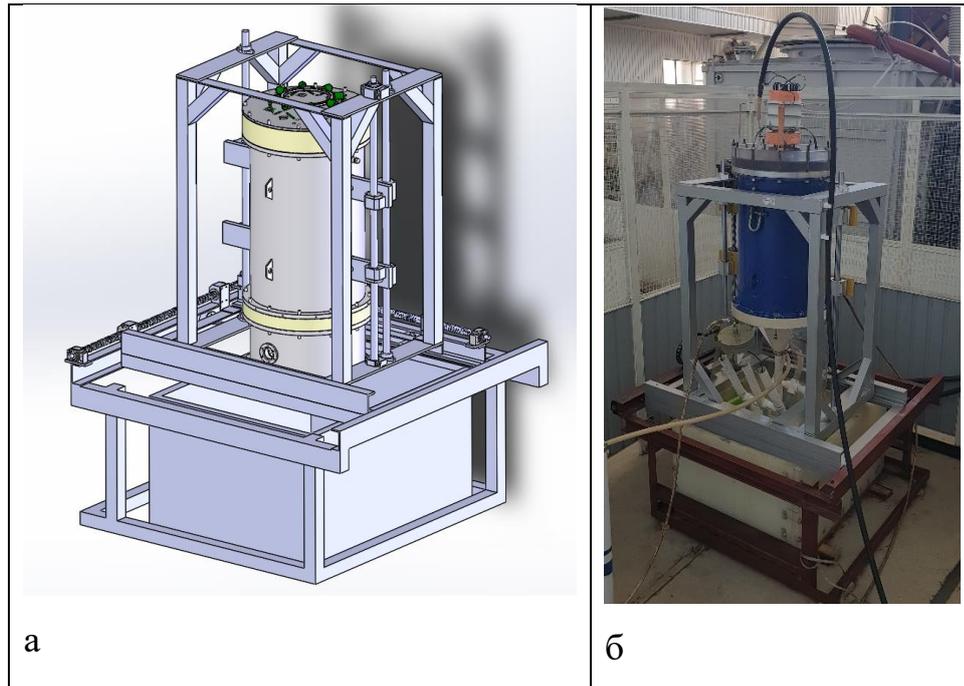


Рисунок 13 – Внешний вид системы позиционирования генератора EG-350:

а) компьютерная модель, б) модель в сборке

2.4 Электродная система

Опыты многоканального пробоя горных пород в условиях двуполярного и однополярного импульса осуществлялись с помощью многоэлектродной системы электродов. Данная система электродов подключалась к генератору EG-350 и устанавливалась на поверхность образца по схеме, представленной на рисунке 14. Образец гранита и электродная система устанавливались в полиэтиленовый бак, наполненный одной из рабочих жидкостей (этиленгликоль, минеральное масло, деионизированная вода, техническая вода), после чего на электроды подавался один импульс напряжения. При воздействии импульса напряжения фиксировались осциллограммы напряжения и тока, проводился визуальный осмотр и фотосъемка образца. В каждой из перечисленных жидких сред испытано по 42 образца (по 6 опытов на каждом из 7 различных уровней напряжения).

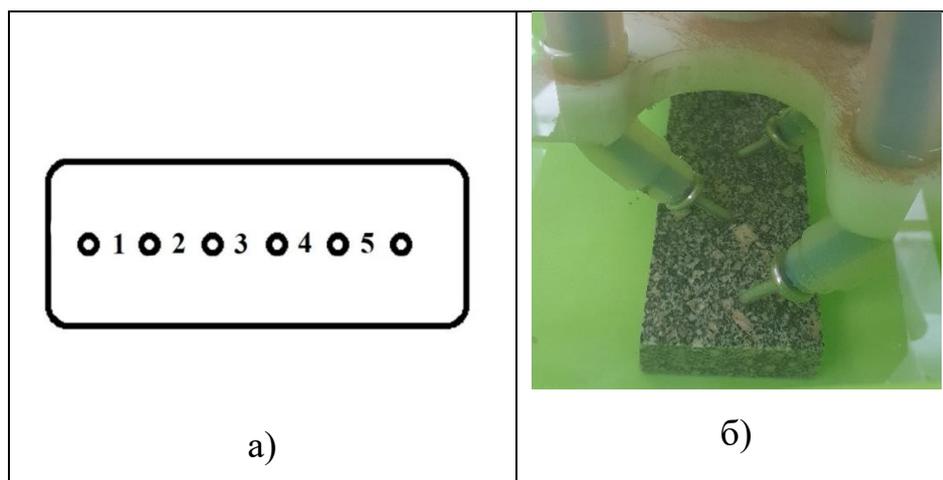


Рисунок 14 – Схема расположения многоазорной системы электродов на образце горной породы: а) точки прилегания электродов на образце; 1,2,3,4,5 – номера межэлектродных промежутков; б) фото расположения электродов на образце

Электродная система (ЭС) представляет собой конструкцию из шести электродов, жестко закрепленных двумя полиэтиленовыми пластинами. В свою очередь, каждый электрод выполнен из стального прута с диаметром 6 мм. По технико-экономическим соображениям в качестве изоляции ЭС была выбрана силиконовая резина в виде различных по диаметру и надетых друг на друга слоев силиконовых трубок. Для уменьшения площади воздействия напряженности электрического поля было сделано ступенчатое снижение толщины слоя изоляции вблизи рабочей зоны. Внешний вид ЭС представлен на рисунке 15.

В ходе экспериментов возникла необходимость в доработке конструкции ввиду возникающих перекрытий некоторых электродов. Данную проблему было решено устранить экранированием «проблемных» электродов путем добавления слоев из фольгированного скотча и полупроводящего компаунда КТК-103. Также, уменьшение напряженности электрического поля вблизи области контакта различных сред (изоляции, металла, воды – тройной точки) осуществлялось экранированием электродов стальным кольцом. Эффективность данного решения показана в работе [99].

Физический смысл конструкции данной электродной системы заключается в том, что, например, при ЭИ бурении всегда применяется многоэлектродная

система. Представленная нами многоэлектродная система хорошо имитирует буровой наконечник при ЭИ бурении горных пород.

Характеристики ЭС:

- межэлектродное расстояние: 45 мм;
- толщина изоляции 12,5 мм;
- сопротивление: 92 Ом (измеритель иммитанса E7-20 при частоте 1 кГц при проводимости воды около $(3,6 - 4,2) \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$)

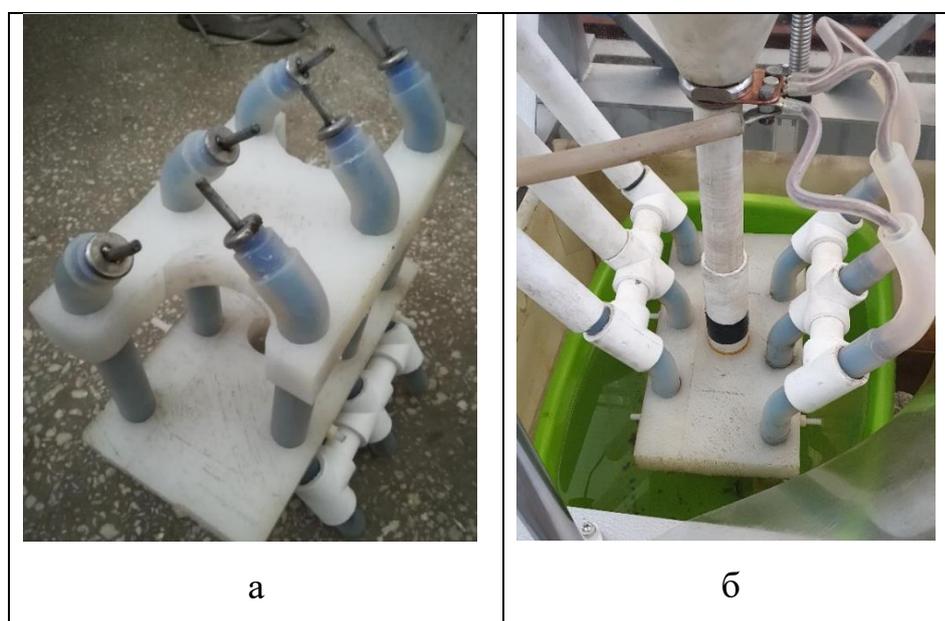


Рисунок 15 – Внешний вид электродной системы: а) рабочая часть; б) соединение ЭС с генератором

Следует отметить, что перед началом целевых экспериментов, ЭС была использована в других опытах, где после воздействия свыше двух тысяч импульсов напряжения видимых признаков нарушения целостности изоляции электродной системы обнаружено не было.

2.5 Средства измерения

В качестве средств измерения в экспериментах с двуполярным импульсом напряжения использовались два малоиндуктивных омических делителя с бифилярной намоткой и коэффициентами деления $K_d = 19$. Значение тока измерялось с помощью токового шунта с сопротивлением $R_{ш} = 16$ мОм. Измерение параметров импульса напряжения в экспериментах по многоканальному пробую осуществлялось с помощью емкостного компенсированного делителя, встроенного в импульсный трансформатор EG-350. Для проверки цепи измерения был использован резистивный делитель импульсного напряжения ДИН ($K_{дин} = 1000$ – коэффициент деления (с встроенным $R_{согл} = 75$ Ом)). На входе осциллографа был подключен ослабитель 1:10. Для исключения колебаний (помех) в измерительной цепи было подключено согласующее сопротивление 75 Ом. Ток измерялся токовым шунтом ($R_{ш} = 0,011$ Ом) с ослабителем 1:20 перед осциллографом и с согласующим сопротивлением 75 Ом для исключения колебаний соответственно. Регистрация сигналов производилась с помощью осциллографа Tektronix TDS3032B. Типовая осциллограмма пробоя представлена на Рисунок Измерительная цепь была построена с учетом рекомендаций и на основе методик, описанных в [100, 101, 102].

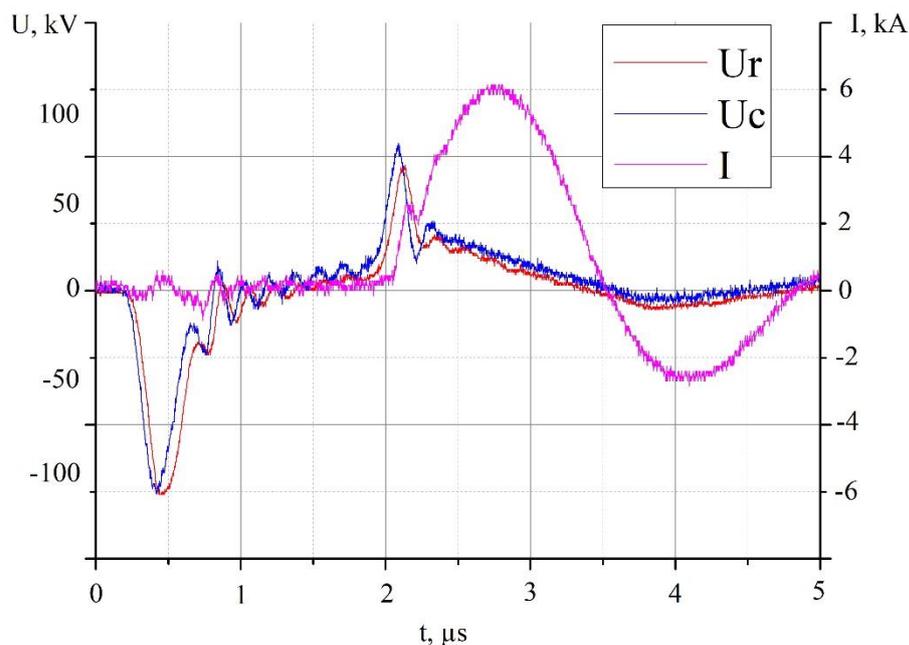


Рисунок 16 – Осциллограммы напряжения и тока. U_r – резистивный делитель, U_c – емкостной делитель, I – шунт

2.6 Описание средств и методики микроскопии образцов гранита

С целью определения вида минеральных включений, имеющих различные электрофизические характеристики и влияющие на траекторию канала разряда, а также с целью определения влияния рабочей жидкости на характер внедрения канала разряда в твердый диэлектрик была произведена сканирующая электронная микроскопия 18 образцов гранита после воздействия импульсным высоким напряжением.

Данное исследование было выполнено с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Hitachi S-3400N с энерго-дисперсионной приставкой (ЭДС) Bruker XFlash 4010 для проведения рентгеноспектрального анализа. Микроскоп находится в расположении учебно-научной лаборатории электронно-оптической диагностики Международного исследовательского научно-образовательного центра (МИНОЦ) отделения геологии инженерной

школы природных ресурсов ТПУ. Съемка (исследование) каждого образца осуществлялось в режиме обратно рассеянных электронов при низком вакууме.

Образцы для микроскопии отбирались по визуальному признаку из условия наличия наблюдаемых невооруженным глазом следов внедрения канала разряда в гранит без образования откольной воронки. Интересующая область каждого образца предварительно вырезалась с помощью камнерезного станка, поскольку габаритные размеры образцов гранита не позволяли поместить их в вакуумную камеру целиком.

Исследование межэлектродной области начиналось с осмотра общего плана образца. Далее, перемещаясь от приэлектродной области одного электрода до противоположного, осматривался трек либо трещина, возникшая вследствие электрического разряда, параллельно делая снимки высокого разрешения приэлектродной области, мест внедрения разряда в гранит и анализ локального элементного состава образцов.

2.7 Моделирование процесса пробоя горной породы

Для решения задачи численного моделирования процесса разрушения и роста трещин под действием электрического разряда применялась хрупко-упругая модель механики деформируемого твердого тела в динамической постановке. Задача решалась в двумерной постановке, что было обусловлено сложностью задания трехмерной структуры гранита. Выбрана конечно-разностная схема второго порядка точности [103, 104] для решения динамических задач. На основе этого метода написана программа на языке Fortran для многопроцессорных систем на основе библиотеки MPI (Message Passing Interface).

В основе системы дифференциальных уравнений, описывающей протекающие процессы, лежат интегральные законы сохранения массы, импульса, моментов количества движения и энергии [105]. В геомеханике моделирование процесса деформирования тела проводится путем численного решения системы

уравнений механики сплошной среды, которая включает уравнения неразрывности, движения или равновесия и энергии:

– неразрывности:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho u_{i,i} = 0, \quad (2.3)$$

– движения:

$$\sigma_{ij,j} + \rho F_i = \rho \frac{du_i}{dt}, \quad (2.4)$$

– равновесия:

$$\sigma_{ij,j} + \rho F_i = 0, \quad (2.5)$$

– энергии (в адиабатическом приближении):

$$\rho \frac{dE}{dt} = \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}. \quad (2.6)$$

где, ρ – плотность материала, u_i – компоненты вектора скорости, σ_{ij} – компоненты тензора напряжений Коши, F_i – массовые силы, E – удельная внутренняя энергия.

В случае, если в определяющие соотношения не входят зависимости от энергии, то последнее уравнение при решении системы можно исключить. Заметим, что в предположении симметрии среды уравнение моментов количества движения сводится к парности касательных напряжений:

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji}. \quad (2.7)$$

Дополнительно необходимо задать кинематику движения, которая определяет скорости от перемещений:

$$u_i = \frac{dx_i}{dt}, \quad (2.8)$$

а также деформации или/и их скорости соотношениями Коши (при условии их малости):

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(x_{i,j} + x_{j,i}), \quad (2.9)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}). \quad (2.10)$$

Замыкают систему уравнений определяющие соотношения, которые конкретизируют поведение среды, задавая связи между тензорами напряжений и деформаций, или их скоростями. После включения в систему определяющих соотношений количество переменных станет равно количеству уравнений, и система может быть решена.

В зависимости от рассматриваемого процесса система уравнений может быть преобразована и количество уравнений и переменных сокращено [106, 107, 108]. Например, при рассмотрении деформации упругой среды, в пренебрежении изменением температуры и плотности, система уравнений будет состоять из уравнения движения и уравнений закона Гука:

$$\sigma_{ij} = \lambda \theta \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad (2.11)$$

где λ и μ – коэффициенты Ламе, σ_{ij} и ε_{ij} – компоненты тензора напряжений и тензора деформаций, $\dot{\theta} = \dot{\varepsilon}_{kk}$ – объемная деформация, δ_{ij} – символ Кронекера.

ГЛАВА 3 ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ И РАЗРУШЕНИЕ ГРАНИТА ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНЫМ СПОСОБОМ

3.1 Экспериментальные результаты по пробоем диэлектриков двуполярным импульсом напряжения

Электрическая прочность диэлектриков (пробивное напряжение) в субмикросекундном диапазоне воздействия двуполярного импульсного напряжения в известной нам литературе отсутствует. Предварительный анализ механизмов развития канала пробоя на положительной и отрицательной полярности импульса напряжения показывает, что при двуполярном воздействии импульсов пробивные напряжения для различных диэлектриков будут меньше, чем при однополярном воздействии даже на положительной полярности, т.к. при этом пробивные напряжения меньше, чем на отрицательной полярности. Ниже приводится данный анализ.

При положительной полярности одного потенциального электрода и заземленного другого электрода разряд с заземленного не успеет зажегаться и начать развиваться за время действия импульса вследствие относительно низкого потенциала на заземленном электроде в следствие экранирующего действия «земли», т.е. за счет влияния «земли» на заземленном электроде напряженность электрического поля понижена. Это препятствует зажиганию и развитию канала разряда с него [49].

При двух потенциальных электродах разной полярности (отсутствует «земля») и при одинаковой величине потенциала на каждом электроде напряженность электрического поля будет определяться только геометрическими параметрами и формой электродов. Для симметричных и одинаковых по конфигурации и размерам электродов напряженность на каждом из них будет одинакова. В этом случае зажигание канала разряда на каждом из них будет определяться механизмом зажигания, который зависит от полярности электрода. На электроде с отрицательной полярностью зажигание канала разряда происходит

с некоторой задержкой и меньшей скоростью развития по сравнению с процессами при положительной полярности электрода. Разряд в твердом теле у положительного электрода зажигается при меньшем напряжении, чем у отрицательного электрода и скорость его продвижения существенно выше ($V_a = (14,1 - 26,7) \cdot 10^6$ см/с – скорость развития канала разряда с анода, $V_k = (0,26 - 7,2) \cdot 10^6$ см/с – скорость развития канала разряда с катода [35, 54]). Главным фактором, определяющим скорость продвижения канала разряда, является напряженность электрического поля на кончиках каналов разрядов, которая в свою очередь определяется приложенным к электродам напряжением и расстоянием между встречно развивающимися каналами с электродов положительной и отрицательной полярности. Это существенно увеличивает напряженность в промежутке между кончиками (головками) каналов, увеличивает скорость их продвижения между электродами и, как следствие, уменьшает пробивное напряжение. Следовательно, пробивное напряжение при двух разнополярных импульсах не может быть больше, чем пробивное напряжение при положительном однополярном импульсе.

С точки зрения ЭИ технологий, главным образом, интересуют процессы пробоя в зависимости от полярности воздействующего напряжения в твердых и жидких диэлектрических материалах, к которым относятся и горные породы. В работах Ю.Н. Вершинина разработана современная теория пробоя твердых диэлектриков на импульсном напряжении [49, 54], которая положена в основу наших предположений.

Воздействие электрического поля на диэлектрики вызывает протекание в них тока. При воздействии высокого напряжения, достаточного для пробоя, ток перед пробоем называется предпробивным. Предпробивной ток в твердом диэлектрике складывается из электронного и дырочного токов, протекающих в одном направлении. Один в зоне проводимости, другой в валентной зоне. В процессе формирования разряда участвуют оба типа носителей заряда – и электроны, и дырки. Однако в одном случае их роль сводится лишь к изменению картины

распределения потенциала и соответственно искривлению энергетических зон в разрядном промежутке, а в другом эти носители заряда отвечают за пробой. Чтобы подчеркнуть их функциональное различие, первые называют неосновными, а вторые – основными носителями заряда. При положительной полярности электрода неосновными носителями будут дырки, а основными – электроны. При отрицательной полярности дырки будут основными, а электроны – неосновными носителями заряда [54].

При развитии разряда с анода ответственными за пробой носителями заряда являются электроны. Тогда скорость развития разряда:

$$V^+ = V_n = \mu_n E(U), \quad (3.1)$$

при развитии разряда с катода ответственными за пробой являются дырки и скорость развития разряда:

$$V^- = V_p = \mu_p E(U), \quad (3.2)$$

где V_n , V_p – скорость диффузии электронов и дырок соответственно; μ_n , μ_p – подвижность электронов и дырок.

Отсюда при $E = const$, где E – напряженность электрического поля на электродах,

$$\frac{V^+}{V^-} = \frac{V_n}{V_p} = \frac{\mu_n}{\mu_p}. \quad (3.3)$$

Подвижность электронов в твердых диэлектриках выше, чем дырок. Следовательно $V^+ > V^-$.

На основании этого, пробивное напряжение на положительной полярности импульса меньше, чем на отрицательной, т.е. $U^+ < U^-$ при $\mu_n > \mu_p$ [49].

Ионизация в канале пробоя структуры диэлектрика осуществляется электронами более интенсивно, чем дырками, что также способствует уменьшению пробивного напряжения при положительной полярности электрода и увеличению V^+ .

Время формирования разряда в твердых диэлектриках является функцией подвижности основных носителей:

$$t_{\phi} = \frac{d}{\mu E_{np}}, \quad (3.4)$$

где d – толщина диэлектрика в месте пробоя; E_{np} – напряженность электрического поля при пробое. Из (3.4) следует, что время формирования разряда:

- 1) увеличивается с возрастанием d ;
- 2) уменьшается с увеличением перенапряжения;
- 3) при положительной полярности меньше, чем при отрицательной полярности электрода, т.к. $\mu_n > \mu_p$ [49].

Это объяснение необходимо дополнить еще двумя факторами, влияющими на эффект полярности:

- 1) вероятность образования первичных электронов P_n больше вероятности образования первичных дырок P_p , т.е. $P_n > P_p$;
- 2) коэффициент ударной ионизации электронами α больше коэффициента ударной ионизации дырками β , т.е. $\alpha = 3\beta$ [49].

Оба эти фактора $p_n > p_p$ и $\alpha > \beta$ приводят к тому, что $E_{np}^+ < E_{np}^-$ [49].

Возникновение первичного канала разряда как с катода, так и с анода имеет одинаковую тепловую физическую природу. Различие состоит в том, что при разряде с катода в его формировании участвуют преимущественно несобственные электроны, а инжектированные из катода, при разряде с анода – собственные электроны из нижних донорных уровней диэлектрика.

При положительной полярности потенциального электрода в резконеоднородном поле разряд начинает развиваться с потенциального электрода при минимальном напряжении пробоя и заканчивается еще до появления разрядов у заземленного (отрицательного) электрода. Напряжение и время пробоя минимальны. Для отрицательной полярности потенциального электрода характерна задержка начала развития разряда и уровень напряжения пробоя заметно выше, чем при положительной полярности [35].

Одновременное приложение напряжений обеих полярностей к электродной системе вызывает увеличение напряженности электрического поля на электроде, который был бы заземлен, ввиду отсутствия действия «земли» [35]. Этот эффект, способствует уменьшению пробивного напряжения между электродами. Кроме этого, развитие двух встречных каналов разряда с обоих электродов, хотя и с некоторой задержкой во времени и меньшей скоростью развития с отрицательного электрода, будет увеличивать напряженность между каналами в процессе их развития и способствовать более быстрому во времени и при меньшем напряжении пробую всего межэлектродного промежутка. На основании вышеизложенного, для двух стержневых потенциальных электродов (резконеоднородное поле) следует ожидать уменьшение пробивного напряжения сравнительно с системой, когда один электрод заземлен.

Поскольку в системе двух симметричных потенциальных электродов одинаковой формы и размеров эффект полярности отсутствует, сравнение пробивных напряжений проводится для однополярных промежутков с положительной полярностью потенциального электрода и заземленного электрода.

Исследования проводились для трех принципиально различных сред – газообразная, жидкая и твердая с целью обнаружения предполагаемого эффекта снижения пробивного напряжения для всех сред. Тем более, что ЭИ эффект осуществляется в комбинированной среде: твердое тело – жидкость. В таблице 5 приведены обобщенные результаты всех экспериментов.

Таблица 5 – Характеристики двуполярного импульсного пробоя разных сред

Материал	S , мм	$U_{np\Sigma}$, кВ	t_{np} , мкс	U_{np} , кВ	$U_{np}/U_{np\Sigma}$	Дисперсия, %	
Песчаник	20	206	0,19	234 [18]	1,18	10—20	[50]
	30	205	0,31	263 [18]	1,28		
Гранит	20	248	0,24	306 [18]	1,23	10—20	[50]
	30	290	0,39	316 [109]	1,1		
	50	320	1,8	362 [109]	1,14		

Продолжение таблицы 5

Вода	15	290	0,38	360 [54]	1,24	8	[50]
Воздух	64	172	0,15	216 [110]	1,25	3—3,16	[111, 112]
	75	219	0,18	244 [113]	1,12		
	97	236	0,19	270 [113]	1,14		

В таблице: S – расстояние между электродами; $U_{np\Sigma}$ – суммарное напряжение пробоя на электродах положительной и отрицательной полярности; t_{np} – длительность времени до пробоя; U_{np} – пробивное напряжение при однополярном положительном электроде из литературных источников для условий, соответствующих нашим экспериментам; $U_{np}/U_{np\Sigma}$ – относительная величина снижения пробивных напряжений при однополярном U_{np} и двухполярном U_{np} потенциальных электродах.

3.1.1 Песчаник

Исследуемая нами порода обладает относительно низким пробивным напряжением $U_{np\Sigma}$ (таблица 5). Увеличение расстояния между электродами в 1,5 раза практически не изменило $U_{np\Sigma}$, что в первую очередь определяется временем до пробоя: при $S = 20$ мм пробой произошел практически на амплитуде импульса напряжения, а при 30 мм – на спаде, что хорошо согласуется с изменением вольт-секундной характеристики. Величина пробивного импульсного напряжения при пробое на спаде определяется по амплитуде. В литературе для близких условий испытаний с однополярным ГИН и практически близких характеристиках песчаника даны значения пробивных напряжений для $S = 20$ мм $U_{np} = 234$ кВ, и для $S = 30$ мм $U_{np} = 263$ кВ. В таблице 5 показано, что сравнительно с литературными данными снижение $U_{np\Sigma}$ достигает 28% [18].

Следует отметить, что при ЭИ эффекте канал разряда в твердом теле, особенно в горных породах, имеет стохастическую и вероятностную природу и его глубина внедрения и длина изменяются от разряда к разряду в широких пределах, что сказывается и на величине пробивного напряжения [109]. Тем не менее можно

констатировать, что для песчаника при обоих потенциальных электродах пробивное напряжение меньше, чем при одном потенциальном, а другом заземленном электродах.

3.1.2 Гранит

Гранит широко используется в ЭИ технологиях как при бурении, так и как модельный материал для электрофизических исследований. Наиболее часто употребляемые в экспериментах других авторов расстояния между электродами изменяется в интервале 10 – 50 мм. Исходя из этого, нами приняты для анализа $S = 20, 30, 50$ мм, что позволяет надежно оценивать полученные результаты.

Из таблицы 5 видно, что пробивное напряжение при однополярном импульсе $U_{пр}$ выше [18, 109], чем при двухполярном. Необходимо отметить, что результаты сравнения для однополярного импульса взяты из разных источников: для $S = 20$ мм – эксперимент [18], для $S = 30$ мм, 50 мм – расчетная формула [109]. Здесь также наблюдается снижение суммарного пробивного напряжения при воздействии на образцы гранита двухполярного импульса напряжения, которое достигает 23% несмотря на то, что пробой происходил как на фронте, так и на спаде импульса напряжения, что превышает дисперсию пробоя разных горных пород (таблица 5) [50].

3.1.3 Вода

Как отмечалось выше, вода как рабочая жидкость в ЭИ технологиях разрушения горных пород, наиболее предпочтительна сравнительно с другими жидкостями (масла, известково-битумные растворы, эмульсии и др.). В частности, поэтому в качестве жидкой среды выбрана вода. К тому же, пробой воды (проводящая жидкость) на импульсном напряжении вызывает затруднения, которые учтены в процессе экспериментов.

В субмикросекундном временном диапазоне воздействия импульсного напряжения электрическая прочность воды существенно превышает электрическую прочность горных пород и приближается к прочности трансформаторного масла [35]. Поэтому расстояние между электродами изменено до $S = 15$ мм вследствие ограниченных возможностей генераторов. И даже в этом случае пробой происходит на спаде импульса напряжения, как у гранита при $S = 30$ и 50 мм (таблица 5).

В работе [114] проведены исследования электрической прочности воды в широком диапазоне изменения расстояний $S = 10—90$ мм. На основании этих результатов в таблице 1 приведено значение $U_{пр}$ для положительного однополярного импульса.

Сравнение полученных результатов показывает, что воздействие двуполярного импульса вызывает снижение пробивного напряжения до 24%, что существенно больше, чем дисперсия пробивных напряжений воды (таблица 5). Следовательно, эффект снижения пробивного напряжения при воздействии двуполярного импульса сохраняется в жидкой среде.

3.1.4 Воздух

Пробой воздуха осуществлялся в квазиоднородном поле шар – шар с переходом в слабонеоднородное при увеличении расстояния более 64 мм. Значения пробивных напряжений для шаровых разрядников различных диаметров и расстояний между шарами приведены в таблицах международной электротехнической комиссии [110]. Однако их использование ограничивается параметрами импульса напряжения – 1,2/50 мкс., т.к. импульсы меньшей длительности требуют поправки, поскольку возрастает пробивное напряжение. Данная поправка учитывается «коэффициентом импульса (β)», который с уменьшением времени воздействия напряжения до 10-8 с. и менее может достигать $(\beta) \geq 2,2$ [113, 115]. С учетом нарушения однородности электрического поля при

увеличении расстояния между электродами больше 0.5 диаметра шаров, коэффициент (β) возрастает [115]. Для наших условий эксперимента (β)=1,4 [50]. В таблице 5 показано, что при воздействии двуполярного импульса, напряжение пробоя уменьшается до 1,25 раза относительно однополярного импульса напряжения, что значительно превышает дисперсию пробивных напряжений воздуха (таблица 1) [111, 112].

Данные исследования показали, что эффект снижения пробивного напряжения при двуполярном воздействии импульсов характерен для всех диэлектрических сред – газ, жидкость, твердое тело. Реализация этого эффекта для ЭИ технологии позволит существенно, более чем в два раза, снизить рабочие напряжения как генераторов импульсов, так и высоковольтных передающих изоляционных систем от генераторов к нагрузке – рабочим электродным системам, которые, например, при бурении, могут быть удалены на сотни - тысячу метров друг от друга.

Также в результате проведенных исследований оказалось, что пробивное напряжение для двуполярных электродов уменьшается и в квазиоднородном поле при пробое воздуха, поскольку зажигание канала разряда в квазиоднородном поле также зависит от полярности электродов, а развитие стримеров и канала пробоя определяется характером поведения электронов и дырок в газе аналогично пробоем твердого и жидкого диэлектриков [110].

3.2 Экспериментальные результаты по многоканальному разрушению горных пород двуполярным импульсом напряжения

Исследование проводилось для двух видов горных пород (песчаник, гранит) с использованием технической воды и минерального масла в качестве рабочей среды с целью определения возможности осуществления пробоя горных пород одновременно в нескольких межэлектродных промежутках за один импульс напряжения в разных жидкостях. Эксперимент выполнялся на той же установке,

что и предыдущий, но вместо двухэлектродной системы была использована многоэлектродная система электродов, описанная в разделе 2.3.

Предварительно для оценки возможности многоканального пробоя горной породы в многоэлектродной системе эксперименты проведены на песчанике, как материале с более низкими пробивными характеристиками, чем другие горные породы, например гранит.

В опытах с песчаником, где в качестве рабочей жидкости использовалась техническая вода, было испытано 5 образцов. Средняя амплитуда напряжения составила 251 кВ. При этом количество одновременно внедренных каналов разряда в образец, сопровождающихся отколом, варьируется от 2 до 3, а в среднем составляет 2,5 внедрения за один импульс напряжения. Объем откольных воронок за весь цикл опыта варьируется от 0,2 до 2,2 см³. Средний объем откольной воронки составил 0,76 см³. На рисунке 17 представлен образец песчаника со следами откола в межэлектродных промежутках.

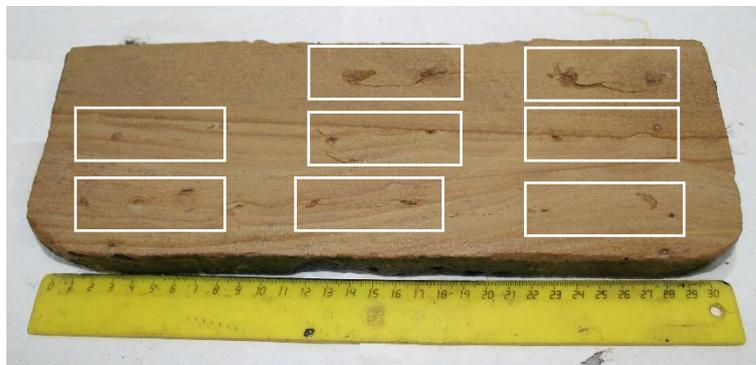


Рисунок 17 – Образец песчаника со следами внедрения и откола после одного импульса напряжения в среде технической воды при разном расположении электродной системы

Из-за больших потерь и отсутствия технической возможности обеспечения достаточного для пробоя гранита уровня напряжения в условиях технической воды, данный опыт проведен в минеральном масле. В опытах с гранитом испытано также 5 образцов. Средняя амплитуда напряжения составляла 247 кВ. При этом

количество одновременно внедренных каналов разряда в образец, сопровождающихся отколом, варьируется от 3 до 4, а в среднем составляет 3,75 внедрения за импульс (Рисунок 18).



Рисунок 18 – Образец гранита со следами внедрения и откола после одного импульса напряжения в среде минерального масла

Электрическое воздействие импульсов напряжения субмикросекундной длительности на многоэлектродную систему во многом определяется комплексным сопротивлением передающей системы от ГИН к электродам (высокочастотное воздействие). С этой целью проведены исследования для двух вариантов подключения: 1) каждый электрод подключен независимым проводником длиной 1,5 м, 2) проводники объединены в точке подключения к электродной системе.

При этом во втором варианте уменьшается активное сопротивление проводов от каждого ГИН, уменьшается индуктивность и увеличивается емкость и, как следствие, уменьшается волновое сопротивление передающей системы примерно в 3 раза для каждого из двух генераторов.

Для варианта с отдельными проводниками в первом опыте произошел откол в двух межэлектродных промежутках. Во втором и третьем опыте обнаружено внедрение в трех промежутках. Общий объем отколотого материала можно рассчитать, как $V_{общ} = V_1 + V_2 + V_3 = 0,8 \text{ мм}^3 + 0,2 \text{ мм}^3 + 0,2 \text{ мм}^3 = 1,2 \text{ мм}^3$, где V_1 , V_2 , V_3 – объем отколотой породы для соответствующего положения электродов.

Данные эксперимента приведены в таблице 6. На рисунке 19а, приведена фотография образца песчаника со следами внедрения и откола при выделении энергии с отдельным подключением каждого электрода к генераторам.

Для варианта с объединенными проводниками в первом и втором опыте произошло внедрение в трех промежутках с выраженной откольной воронкой в одном из них (Рисунок 19б). В третьем опыте – близкий по объему разрушения откол в двух промежутках. Общий объем отколотого материала рассчитывался, как и в предыдущих опытах $V_{общ} = 1,3 \text{ мм}^3 + 0,5 \text{ мм}^3 + 2,3 \text{ мм}^3 = 4,1 \text{ мм}^3$, что в 3,31 раза больше, чем при отдельной индуктивности. Рисунок 19б иллюстрирует внедрение и откол в песчанике при уменьшении комплексного сопротивления подключающих нагрузку-электродную систему проводов в среднем практически в 6 раз, что увеличило энергию, выделившуюся в каналах пробоя.

Таблица 6 – Данные экспериментов по пробоем песчаника при разной индуктивности электродов

Номер образца	Раздельные проводники				Объединенные проводники				V_2 / V_1
	U_3 , кВ	U_{a+} , кВ	U_{a-} , кВ	V_1 , мм ³	U_3 , кВ	U_{a+} , кВ	U_{a-} , кВ	V_2 , мм ³	
1	35,2	128,4	117	0,8	36,1	99,7	112,5	1,3	1,62
2	35,2	139,8	121,6	0,2	36,1	111	109,4	0,5	2,5
3	36,1	129,2	136,8	0,2	36,1	149	109,4	2,3	11,5
Среднее	35,5	132,4	125,1	0,4	36,1	119,9	110,4	1,36	5,2

В таблице: U_3 – зарядное напряжение; U_{a+} – амплитудное напряжение положительной полярности; U_{a-} – амплитудное напряжение отрицательной полярности; V – объем разрушения.

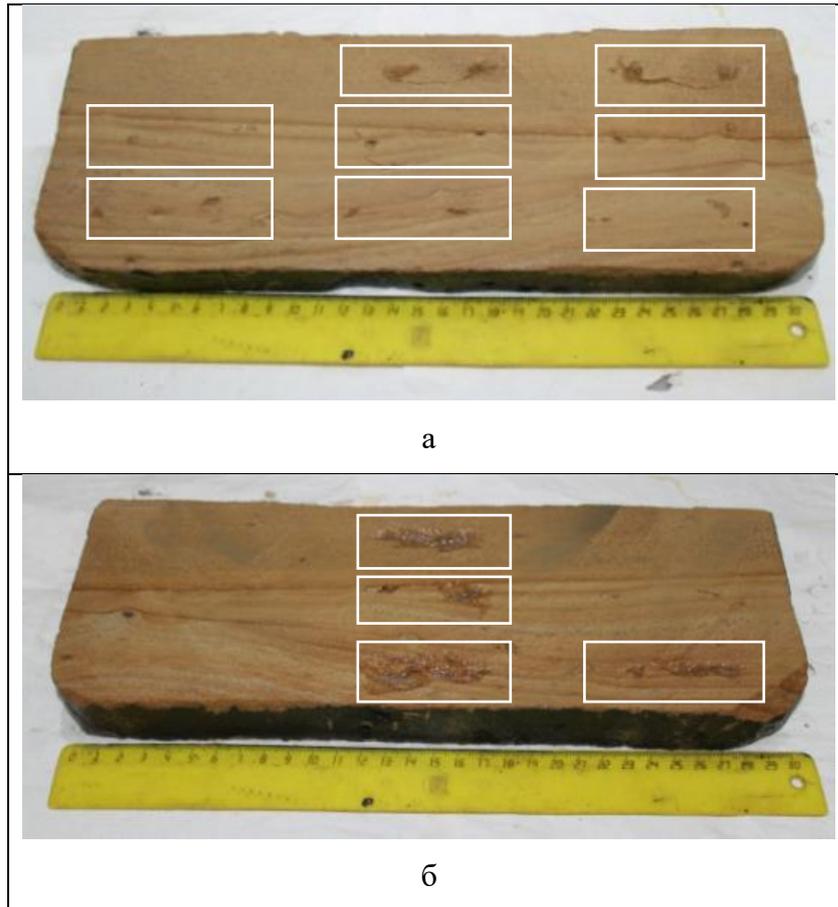


Рисунок 19 – Внешний вид образцов песчаника после воздействия импульсов напряжения

а) Раздельная индуктивность; б) Объединенная индуктивность

Поскольку внедрение канала разряда и объем разрушения носят вероятностный характер, а увеличение энергии, выделившейся в канале разряда, увеличивает объем разрушения. Поэтому объем отколотого материала во втором варианте для одного из этих промежутков значительно превосходит остальные. Общий объем отколотого материала между промежутками при этом больше, чем в первом варианте.

Таким образом, чем больше комплексное сопротивление проводов, соединяющих электроды, тем меньше объем разрушения при многоканальном пробое. Следовательно, это один из факторов, влияющих на производительность (объем) разрушения в ЭИ технологиях разрушения горных пород. Однако, есть ряд других факторов, влияющих на возникновение многоканального пробоя, таких как:

жидкая среда, полярность импульса, запас энергии в импульсе, крутизна импульса, определив влияние и подобрав оптимальные параметры которых, можно добиться лучшего технологического эффекта.

По результатам эксперимента показана возможность осуществления пробоя горной породы в нескольких межэлектродных промежутках за один импульс в среде трансформаторного масла и технической воды при воздействии двуполярным импульсом.

3.3 Экспериментальные результаты по многоканальному пробоя и разрушению гранита однополярным импульсом напряжения

Исследования проводились при воздействии однополярного импульса в четырех различных жидких средах – минеральное масло, этиленгликоль, деионизованная вода и техническая вода с целью определения влияния электрофизических свойств жидкости (диэлектрическая проницаемость и удельная электропроводность) на формирование многоканального пробоя в граните при различных уровнях напряжения. В таблице 7 приведены обобщенные результаты всех опытов. Поскольку для набора статистики испытывалось по 6 образцов на семи различных уровнях напряжения в каждой из перечисленных сред (всего 168 образцов), данные в таблице приводятся в виде диапазона (от минимального до максимального уровня напряжения) усредненных значений результатов пробоя всех 6 образцов, а динамика их изменения приведена ниже в данном разделе (рисунки 20, 21).

Таблица 7 – Характеристики многоканального пробоя в различных жидких средах

Вид жидкой среды	$U_{пр. ср.}$, кВ	$E_{ср}$, кВ/см	Q , см ³ /имп	$V_{ср}$, см ³	$V_{общ}$, см ³	$N_{ср}$
Минеральное масло	300—410	66,6—90	0,33—1,2	0,6—1,45	2—7,2	1,1—1,6
Этиленгликоль	300—422	66,6—93,2	0,06—0,8	0,2—0,96	0,4—4,8	0,6—2,6

Продолжение таблицы 7

Деионизованная вода	300—368	66,6—81,8	0,03—0,4	≈0,86	0,2—2,6	0,3—0,5
Техническая вода	284	63	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

В таблице: $U_{пр. ср}$ – среднее пробивное напряжение; $E_{ср}$ – средняя напряженность электрического поля на электродах; Q – производительность разрушения; $V_{ср}$ – средний объем разрушения; $V_{общ}$ – общий объем разрушения, $N_{ср}$ – диапазон среднего количества каналов разряда.

Из таблицы 7 видно, что в условиях данного эксперимента одновременное образование нескольких каналов разряда в горной породе за один импульс имеет стохастический характер во всех использованных жидкостях, а количество каналов изменяется от разряда к разряду: в минеральном масле и деионизованной воде количество каналов за один импульс варьировалось в пределах от 0 до 3, этиленгликоле – от 0 до 4, технической воде – от 0 до 2. При этом по мере снижения уровня напряжения количество одновременно образовавшихся каналов внедрения снижается во всех исследованных жидкостях.

Следует отметить, что цикл опытов в среде технической воды является незавершенным по причине существенных потерь и отсутствия технической возможности обеспечить напряжение разряда выше имеющегося (284 кВ). Тем не менее, при данном уровне напряжения были зафиксированы пробои одновременно в двух межэлектродных промежутках.

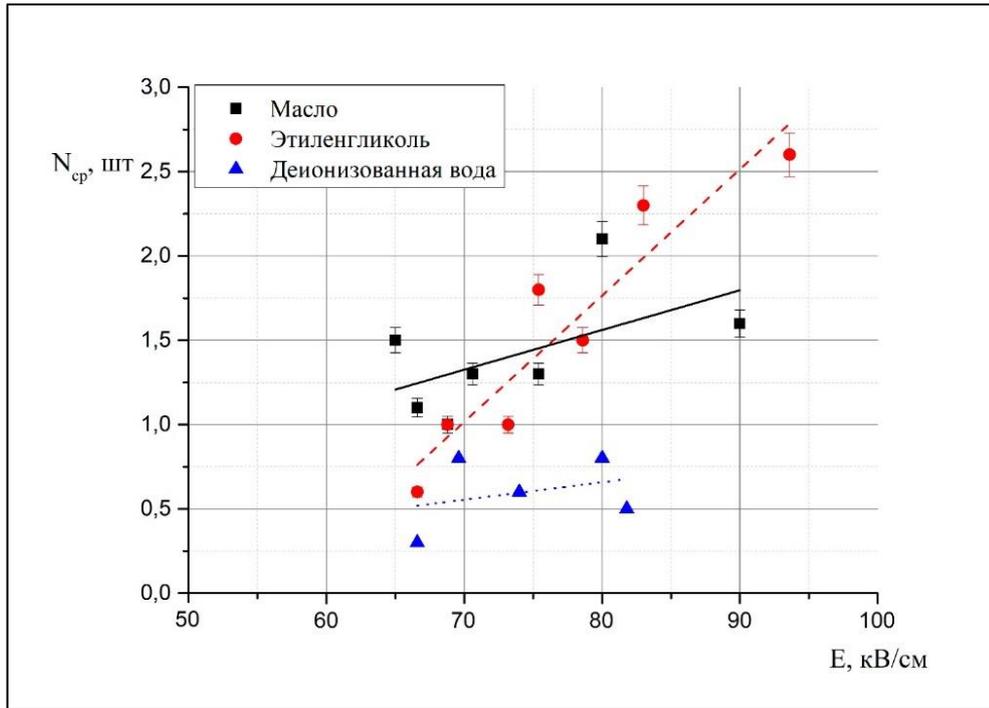


Рисунок 20 – Зависимость среднего количества внедренных каналов от напряженности электрического поля

На рисунке 20 приведены результаты опытов, где представлены зависимости числа многоканальных пробоев от средней напряженности электрического поля для указанных жидкостей. Видно, что с увеличением напряженности увеличивается количество одновременных внедрений для масла, этиленгликоля и деионизованной воды. Наибольшее количество многоканальных внедрений характерно для этиленгликоля при высоких напряженностях электрического поля ($E_{ср} \geq 80$ кВ/см) (таблица 7). Этот эффект определяется его электрофизическими характеристиками – диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 37$ и удельной электропроводностью $\gamma = 10^{-6}$ 1/Ом · см., что влияет на распределение электрического поля вблизи потенциального электрода в жидкости и, как следствие, на вероятность внедрения канала в гранит [16]. У трансформаторного масла электрофизические характеристики значительно отличаются: $\varepsilon = 2,2$; $\gamma = 10^{12}$ Ом · см [110]. Диэлектрическая проницаемость жидкостей и скорость развития разрядов в жидкостях в первую очередь влияют на распределение электрических полей в межэлектродных промежутках, особенно вблизи электродов. Средняя

скорость развития разряда в резконеоднородном поле при отрицательной полярности импульса напряжения:

Трансформаторное масло – $(4,5 - 5) \cdot 10^5$ см/с;

Этиленгликоль – $(2 - 2,5) \cdot 10^5$ см/с;

Дистиллированная вода – $6 \cdot 10^4$ см/с [46]

Характерным явлением при разряде в воде с отрицательного острия является «аномально низкая скорость развития лидера составляющая $6 \cdot 10^4$ см/с [46]», что значительно ниже при разряде с положительного острия - $1,4 \cdot 10^6$ см/с. [46, 56]. Из-за малой скорости развития отрицательного канала разряда в воде электрическая прочность разрядного промежутка в ~ 3 раза больше, чем при положительной полярности потенциального электрода [56]. Это хорошо известный эффект полярности для полярных жидкостей, которыми являются вода и этиленгликоль в данных экспериментах.

Уменьшение скорости развития разряда, в первую очередь в начальный период зажигания разряда и развития ионизационных процессов вблизи электрода, способствует образованию объемного заряда вокруг электрода с большей концентрацией частиц и большей степени выравнивания электрического поля, уменьшением коэффициента неоднородности электрического поля. Это вызывает остановку продвижения канала разряда, например в воде. Разряд имеет ступенчатый характер развития по всей длине межэлектродного промежутка [46]. Дальнейшее продвижение разряда, образование лидера с границы объемного разряда, требует повышения напряженности на поверхности объемного заряда. Увеличение напряженности в разрядном промежутке способствует увеличению количества многоканальных разрядов, как следует из результатов на рисунке 20.

Если отмеченное выше предположение верно, то для воды эффект увеличения количества внедрений должен быть выше при большей напряженности, чем для этиленгликоля, т.к. у воды $\varepsilon = 80$, а удельная электропроводность деионизованной воды, используемой нами, $\gamma = 10^{-5}$ 1/Ом см. Но технические возможности применяемого генератора импульсов не позволили

получить среднюю напряженность между электродами в воде более $E_{cp} \leq 80$ кВ/см (рисунок 20).

При работе с технической водой данный эффект наблюдается несмотря на незавершенный цикл проделанных опытов. Незавершенность цикла связана с потерями в технической воде, и как следствие, невозможностью достичь необходимых значений напряженности электрического поля для осуществления внедрения разряда в гранит.

Рисунок 21 иллюстрирует зависимость производительности разрушения гранита от средней напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке при воздействии отрицательного однополярного импульса напряжения. В связи с значительной «посадкой» напряжения и большой потерей энергии в предпробивной стадии за счет низкого удельного сопротивления технической воды производительность разрушения для нее на рисунке 21 не рассматривается.

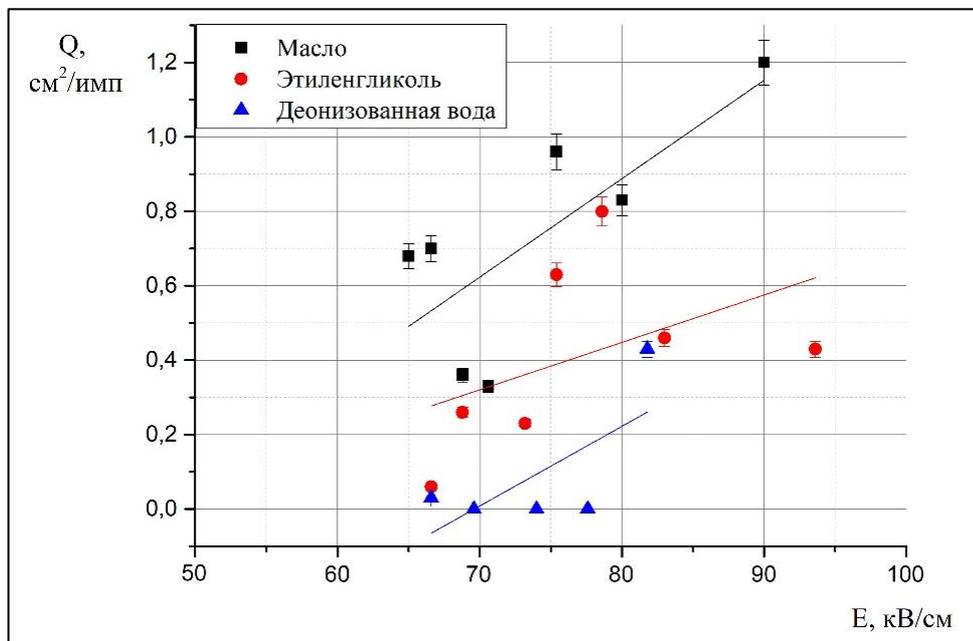


Рисунок 21 – Зависимость производительности разрушения от напряженности электрического поля

Из рисунка 21 следует, что с увеличением средней напряженности электрического поля производительность разрушения гранита увеличивается для рассматриваемых жидкостей, несмотря на бóльшую дисперсию экспериментальных результатов. Наибольшая производительность в наших экспериментах соответствует разряду в масле. Уменьшение производительности разрушения для этиленгликоля и воды, обусловлено, в первую очередь, уменьшением энергии в канале разряда из-за потерь в предпробивной стадии.

Известно, что вероятность и глубина внедрения разряда однозначно растет с увеличением крутизны фронта импульса, которая в наших экспериментах увеличивается с увеличением амплитуды напряжения и уменьшением времени до пробоя [50].

Необходимо отметить, что места внедрения канала (номер межэлектродного промежутка) носят случайный характер. Тем не менее, в каждой из исследованных жидких сред наблюдалось одновременное внедрение каналов разряда в образец гранита за один импульс напряжения с разной степенью эффективности, что подтверждает возможность формирования многоканального пробоя.

Из полученных результатов можно заключить, что при данных условиях, наименее благоприятной средой для внедрения канала разряда и для формирования многоканального разрушения является техническая вода, в основном по причине значительных потерь напряжения и энергии импульса в предразрядный период.

С точки зрения многоканального разрушения наиболее благоприятной средой оказался этиленгликоль, т.к в опытах с этой жидкостью количество одновременно внедренных каналов было максимальным по сравнению с другими жидкостями (рисунок 20), однако результаты по производительности все же уступают результатам опытов в масле (рисунок 21), вследствие потерь энергии в предпробивной стадии.

Результаты, полученные в экспериментах по многоканальному пробоям неоднозначны с точки зрения целесообразности развития данного способа и требуют дальнейших исследований. Эксперименты показали, что при равном

энерговкладе в импульсе напряжения, увеличение количества одновременных внедрений каналов разряда ведет к снижению общего объема разрушения за один импульс напряжения, что говорит о перераспределении всей энергии по каналам разряда и снижению производительности каждого из них. При этом энергия распределяется по каналам случайным образом. С другой стороны, при данном подходе происходит одновременное разупрочнение большей площади поверхности горной породы, что может нивелировать потери эффективности единичного канала разряда и быть выгоднее, например при комбинированных (электромеханических) способах разрушения.

3.4 Моделирование

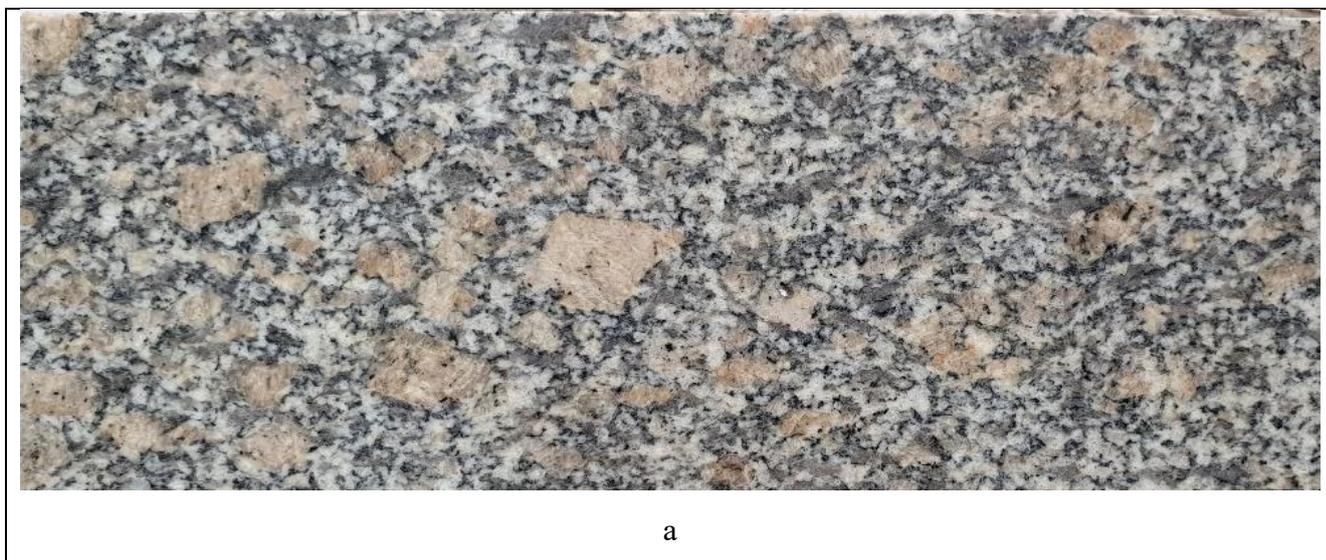
В ходе экспериментов по многоканальному пробойю было замечено, что интенсивность/производительность каждого отдельного канала изменяется в зависимости от их количества (одновременных внедрений канала разряда в гранит), что может говорить о перераспределении всей энергии импульса напряжения по каждому каналу разряда и снижению либо увеличению их производительности по отдельности. Как было ранее отмечено, различное количество одновременных внедрений ведет также к различному охвату площади разрушения, разупрочнения и образования несплошностей внутри горной породы.

Согласно современным представлениям, электроимпульсный пробой твердого тела рассматривается как последовательность взаимосвязанных процессов, которые условно принято разделять на две основные стадии. Первая стадия – это электрический пробой диэлектрического материала, т.е. инициирование и развитие каналов разряда до их перекрытия всего межэлектродного промежутка. Вторая стадия – выделение энергии в образованный канал разряда с последующим его расширением и как следствие распространением ударно-волновых возмущений, формирование механических напряжений, упругопластических деформаций и разрушение твердого тела. Моделирование

посвящено второй стадии, а именно исследованию процессов волновой динамики, возникновению несплошностей и росту трещин в граните в зависимости от количества одновременных внедрений канала разряда (многоканального пробоя) при заданном уровне энерговыклада. Инициирование и формирование стохастично развивающихся каналов в твердом теле не рассматривается.

3.4.1 Структура гранита

Внедрение канала разряда в твердый диэлектрический материал определяется в первую очередь электрофизическими свойствами состава твердого диэлектрика. Поэтому для численного моделирования процесса роста трещин в граните под действием канала разряда и получения правдоподобной картины распределения интенсивности касательных механических напряжений и давления было необходимо создать реалистичную структурную карту мезообъема гранита (рисунок 22).



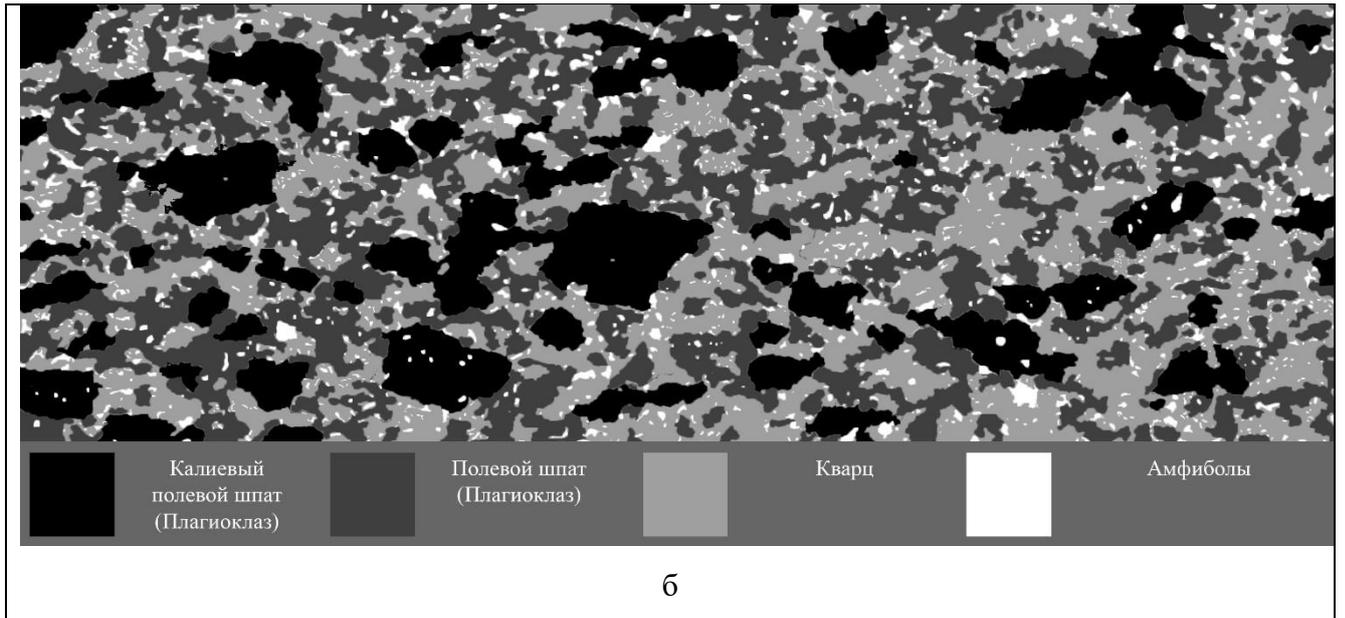


Рисунок 22 – Структурная карта моделируемого образца гранита

а) Фотография среза реального образца б) Модель структуры гранита

Структура гранита задавалась в явном виде с использованием среза реального образца в многофункциональном графическом редакторе. Данные о физико-механических свойствах основных структурных компонентов (кварца, плагиоклаза и слюд – биотита и/или мусковита) брались из литературных источников [116, 117].

Поскольку для калиевого и полевых шпатов данных в литературе не нашлось, было принято решение определить их на основе простой смесевой модели. В упругом приближении эффективные упругие модули материала со структурой можно определить как:

$$E_{eff} = \frac{\sum v_i E_i}{V} \quad (3.5),$$

где v_i – объемная доля компонента, E_i – упругий модуль компонента, V – полный объем.

Зная объемные доли каждого компонента, известные данные и эффективные свойства гранита, данное уравнение разрешается относительно неизвестных. Для проверки данного подхода численно решалась задача об одноосном нагружении

образца. На основе полученной диаграммы нагружения (Рисунок 23) определялись эффективные упругие модули образца гранита.

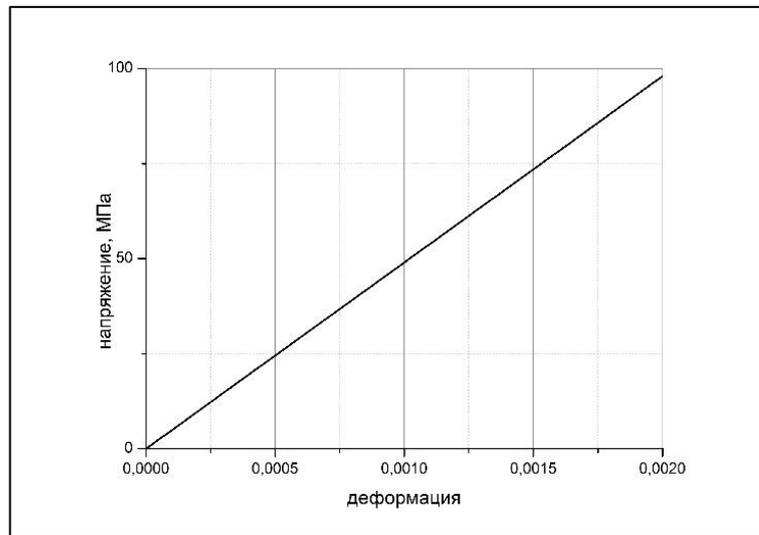


Рисунок 23 – Диаграмма нагружения полученная в результате численного моделирования

3.4.2 Моделирование разрушения и роста трещин

Для моделирования роста трещин в модель необходимо было добавить критерий разрушения. В данном случае была использована хрупко-упругая модель, т.е. предполагается, что на мезоуровне структурные элементы не испытывают пластической деформации, а при достижении некоторого критического напряжения при локальном растяжении происходит разрушение.

Один из способов расчета механического поведения среды при разрушении заключается в связном учете повреждаемости среды в ходе пластической деформации. При таком подходе континуальной механики разрушения часто используются соотношения теории пластичности, а разделение на пластическую и хрупкую деформацию становится условным. В этом случае объемные изменения, связанные с образованием микротрещин, учитываются без перехода на макроуровень, а соответственно и без применения специальных процедур описания трещин. Такой подход оказывается оправданным в случае множественного разрушения без формирования магистральных трещин. Его применение особенно

эффективно в задачах, связанных с деформированием горных пород в условиях сжатия и сдвига.

В поставленной задаче проблема заключается в расчете напряженно-деформированного состояния в разрушенной области при образовании трещин. В этом случае необходимо описание возникающих разрывов и пустот масштаба, соответствующего ячейкам расчетной сетки. С этой целью использовались различные способы учета разрушения. Первый, наиболее простой из них, который использовался в данной работе, состоит в коррекции напряжений и даже удалении расчетных ячеек в зоне разрушения [118, 119], т.е. без явного введения поверхностей конкретных трещин. Здесь необходимо отметить одну из основополагающих работ [118], в которой при этом принимаются во внимание ориентация и раскрытие неявно введенных трещин.

Таким образом, система уравнений (2.3) – (2.11) дополняется критерием разрушения. При достижении напряжения критической величины $\sigma \geq \sigma_{вр}$, где $\sigma_{вр}$ – предел прочности на растяжение, расчетная ячейка считается разрушенной, напряжения в ней обнуляются и в дальнейшем она может сопротивляться только сжатию и сдвигу.

В качестве тестового расчета предлагается модель с пятью каналами разряда (Рисунок 24). В рамках представленной модели, траектории разрядов задавались до моделирования разрушения и предполагается, что в процессе они не меняют своей геометрии. Затем в канале происходит рост давления.

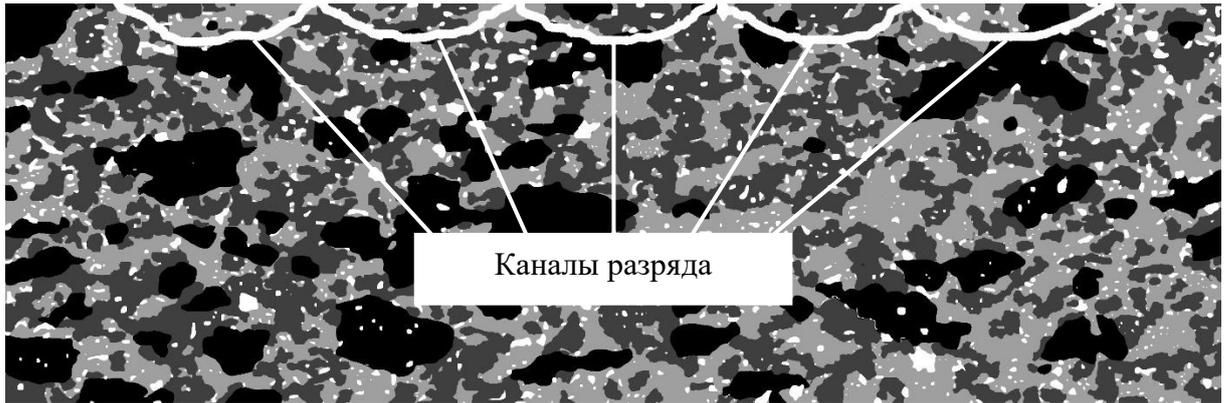


Рисунок 24 – Каналы разряда в образце гранита

3.4.3 Результаты моделирования

В граните образуются несплошности соответствующие каналам разряда, а также происходит рост трещин вблизи поверхности, что соответствует выкрашиванию материала (Рисунок 26). Кроме этого, трещины зарождаются на глубине под электродами, эти точки соответствуют местам пересечения отраженных от поверхности волн растяжения.

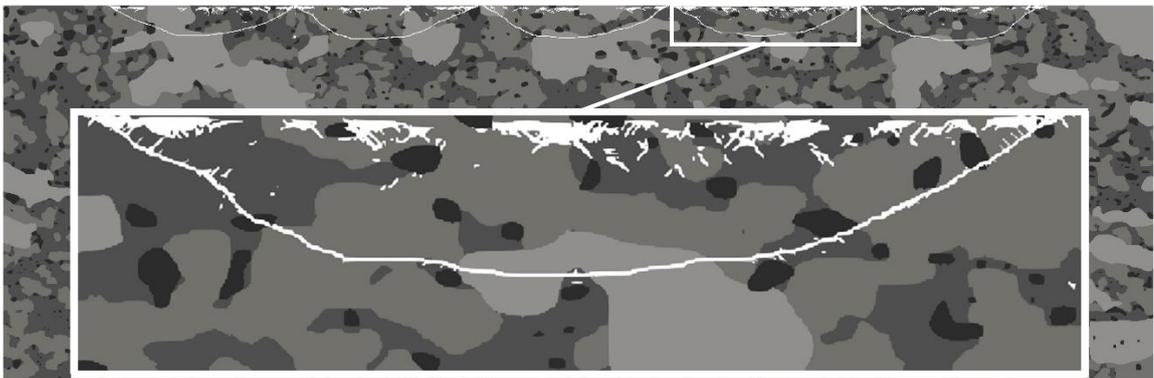


Рисунок 26 – Рост трещин в образце гранита

На рисунке 27 и рисунке 28 представлены распределения интенсивности касательных напряжений и давления. Наглядно показана волновая картина, распределения напряжений. Кроме импульса от канала, можно наблюдать отраженные от поверхности волны, и формирующиеся в их фронтах трещины. На распределении давления (Рисунок 27) видно, что в глубину образца от разряда

распространяется волна сжатия, а от поверхности идет волна растяжения, во фронте которой формируются трещины.

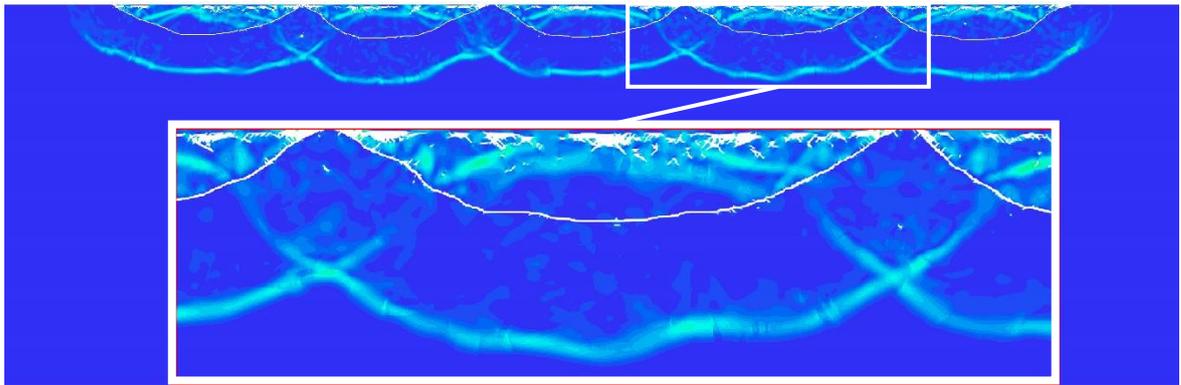


Рисунок 27 – Интенсивность касательных напряжений

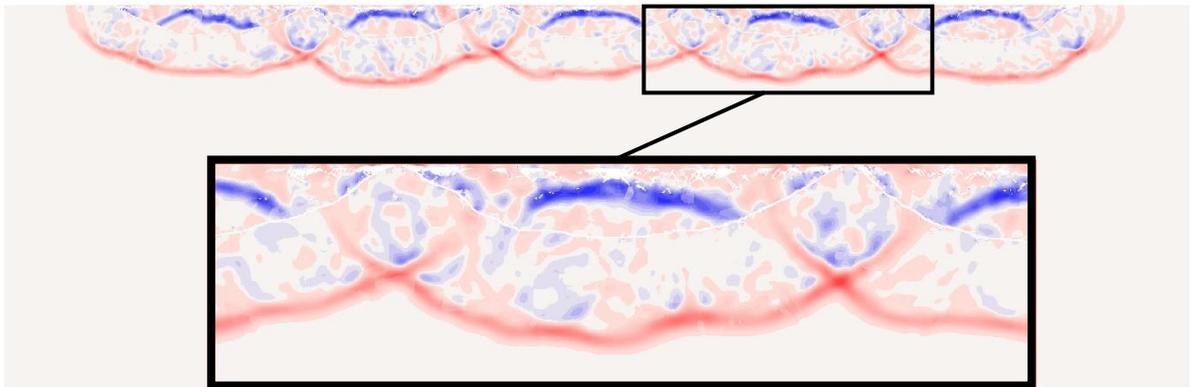


Рисунок 28 – Распределение давления (синий цвет – силы растяжения, красный цвет – силы сжатия)

Также, на полученной структурной модели гранита была проведена серия численных экспериментов, где в явном виде задавались 1, 3 и 5 каналов разряда. Вариация числа каналов имитирует ситуацию, когда между некоторыми электродами не происходит пробой. При этом общая энергия, закаченная в каналы, сохраняется. В численной модели процесса воздействие разрядного канала задается посредством импульса давления в канале. Таким образом представлены результаты для суммарных значений давления 50, 100 и 150 МПа. Использована модель хрупкого разрушения. При достижении объемных растягивающих напряжений предела прочности, материал в данной расчетной ячейке считается

разрушенным, и ячейка “удаляется” из расчетной области (трещины на рисунках представлены в виде пустот в объеме).

Стоит отметить, что данные по пределу прочности для выделенной группы компонентов гранита в основном отсутствуют. В приведенных расчетах принимались следующие значения: для кварца 5 МПа, плагиоклаз, темноцветные минералы и шпат – 3 МПа.

В результате численного моделирования можно отметить следующие результаты. При суммарном давлении 50 МПа трещины возникают только при единичном канале пробоя во фронте отраженной волны разрежения. В остальных случаях мощности разряда для преодоления предела прочности недостаточно. При 100 МПа трещины не возникают при 5 каналах пробоя, для 3 – формируются незначительные трещины отрыва вблизи поверхности, для 1 канала – кроме интенсивного разрушения вблизи поверхности начинают зарождаться радиальные трещины. При 150 МПа для 5 каналов наблюдаются незначительные трещины отрыва, для 3 – формируются трещины отрыва и радиальные трещины, а для 1 наблюдается обширное разрушение материала. Кроме того, стоит отметить тот факт, что при 150 МПа во фронте отраженной волны начинают разрушаться наиболее прочные зерна кварца, что в предыдущих опытах не наблюдалось.

Для наглядности приведена таблица 8, в которой показано как распределялось общее давление на заданное количество каналов разряда (1, 3, 5).

Таблица 8 – Распределение давления по каналам для различных случаев

Количество каналов	50 МПа	100 МПа	150 МПа
1	50	100	150
3	16,7	33,3	50
5	10	20	30

Очевидно, по удельному давлению (МПа/1 канал) можно выделить три группы картин разрушения:

1. Разрушения нет. К данной группе относятся случаи с 5 каналами при 50 и 100 МПа и в случае с 3 каналами при 50 МПа.

2. Трещины отрыва вблизи поверхности. Случаи с 5 каналами при 150 МПа, с 3 каналами при 100 МПа и с 1 каналом при 50 МПа.

3. Трещины отрыва и радиальные трещины вблизи канала. Случаи с 3 каналами при 150 МПа и с 1 каналом при 100 и 150 МПа.

Кроме того, из распределений объемных сжатия и растяжения видно, в каких случаях во фронте волны был достигнут предел прочности для отдельных компонентов гранита.

Важно отметить, что величина давления во фронте удаляющейся волны на порядок ниже давления в канале, что объясняется не диссипацией энергии. В нашей упруго-хрупкой модели ее нет. Это связано с геометрическим рассеиванием, когда энергия распространяющейся волны угасает пропорционально расстоянию от источника. Диаметр канала мал и удельная плотность энергии во фронте волны интенсивно падает по мере удаления.

Что касается охвата площади воздействия возникающих возмущений внутри гранита, то на рисунках 29-31 видно, что при возникновении одного канала разряда, формирование изменяющихся полей механических напряжений и деформаций охватывает около 25% всей площади образца гранита, в то время как при 5 каналах разряда и том же количестве общей энергии охват составляет $\approx 90\%$, что существенно больше по сравнению с одним внедрением. При 3 каналах разряда охват составляет $\approx 75\%$.

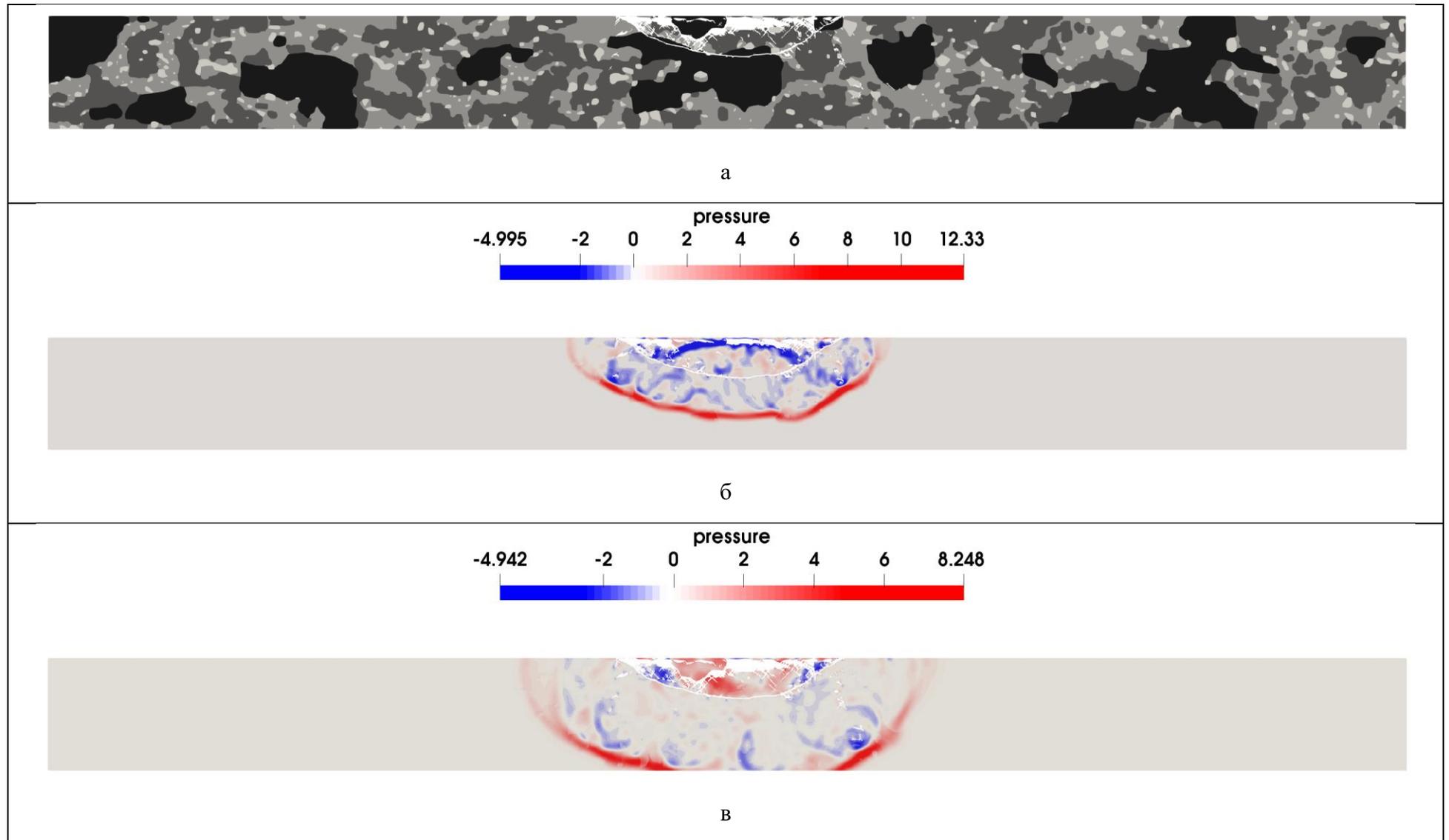


Рисунок 29 – Смоделированная картина волновой динамики при возникновении одного канала разряда в образце:
а) Распределение трещин отрыва; (б, в) Распределение давления в момент полного отражения волны растяжения от поверхности образца

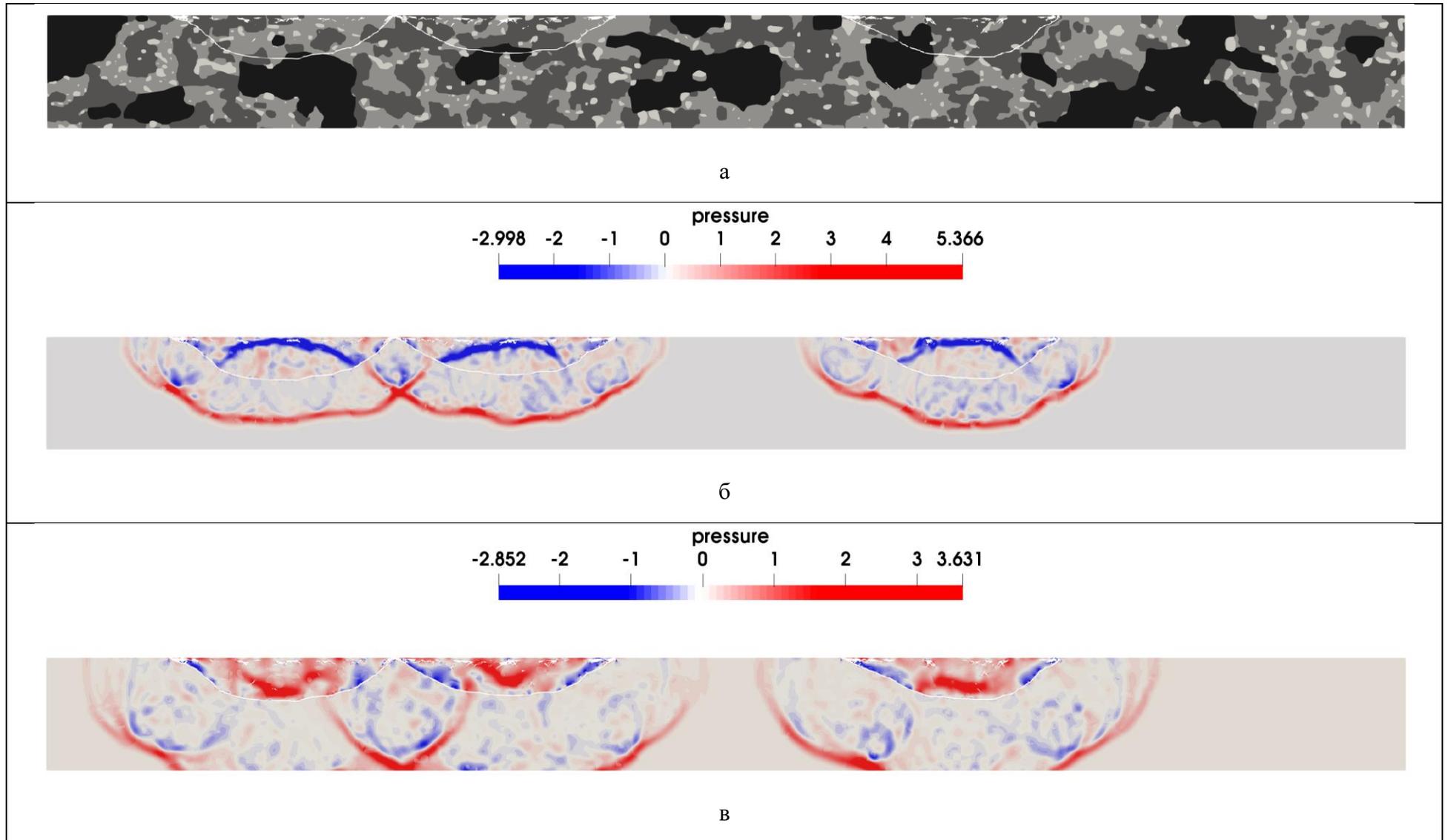


Рисунок 30 – Смоделированная картина волновой динамики при возникновении трех каналов разряда в образце:
а) Распределение трещин отрыва; (б, в) Распределение давления в момент полного отражения волны растяжения от поверхности образца

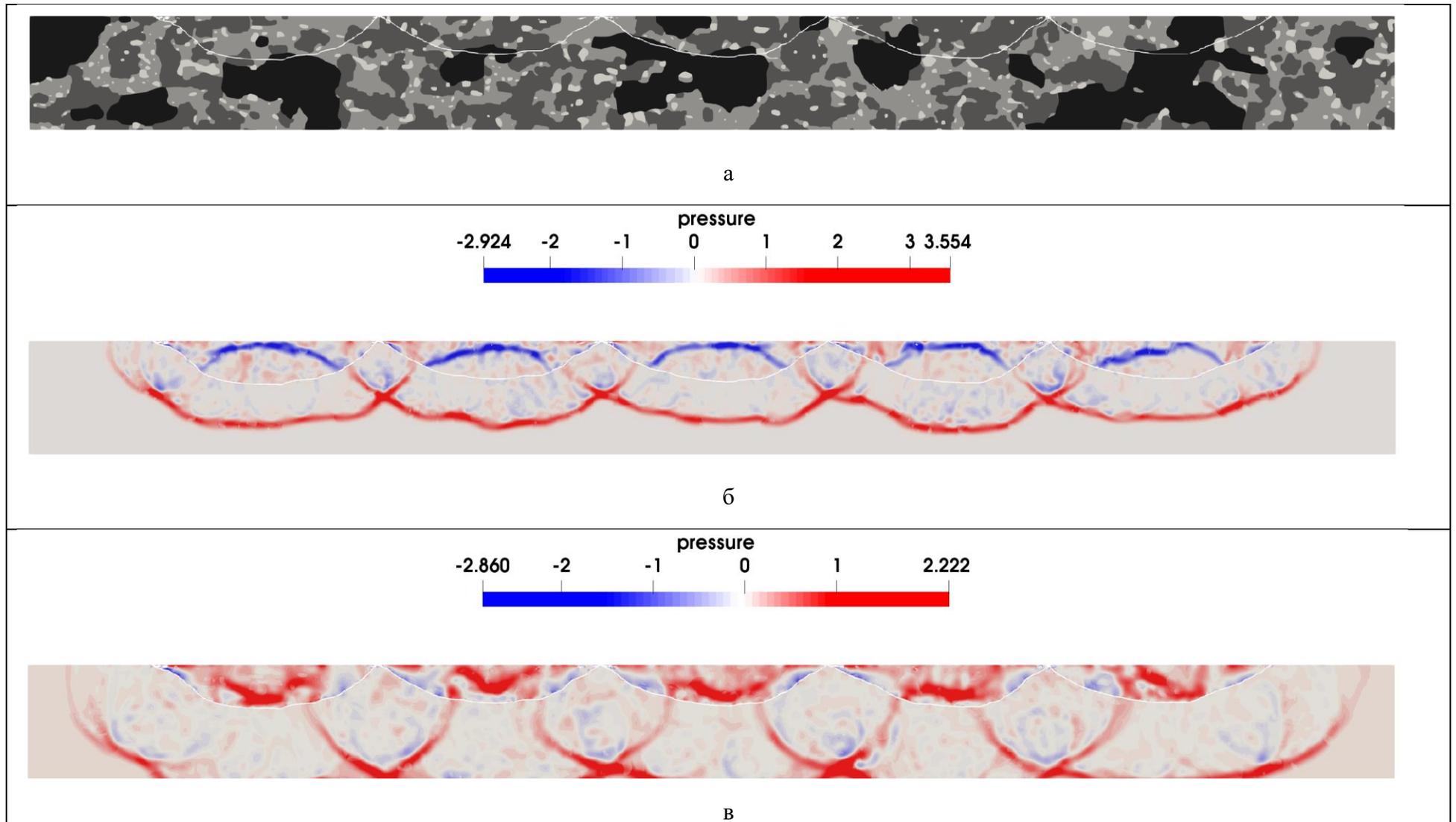


Рисунок 31 – Смоделированная картина волновой динамики при возникновении пяти каналов разряда в образце:
а) Распределение трещин отрыва; (б, в) Распределение давления в момент полного отражения волны растяжения от поверхности образца

Таким образом, моделирование показало, что уменьшение объема разрушения при увеличении количества одновременных внедрений каналов разряда в некоторой степени нивелируется увеличением охвата механических возмущений в объеме образца гранита, приводящих к его разупрочнению.

3.5 Микроскопия

На траекторию канала разряда существенным образом влияют искажения поля, обусловленные составом и структурой горной породы. Меньшая глубина внедрения разряда отличает гетерогенные породы от гомогенных [35 50]. Прежде всего сказывается искажение картины электрического поля зернами минералов с различными диэлектрической проницаемостью и удельным сопротивлением, как в граните. Длина траектории канала разряда в системе наложенных на одну поверхность образца электродов заметно отличается от величины межэлектродного кратчайшего расстояния. Например, в промежутке с $S = 10$ мм она достигает 20 мм [35].

Для подтверждения или опровержения, высказанного выше в [18, 35, 50] предложения о влиянии структурного состава горной породы на вероятность внедрения канала разряда в гранит, была проведена микроскопия межэлектродной области гранита вблизи электродов, где возможно ударное воздействие электродов на горную породу и обнаружение влияния минерального состава поверхности образцов на зарождение и развитие канала разряда.

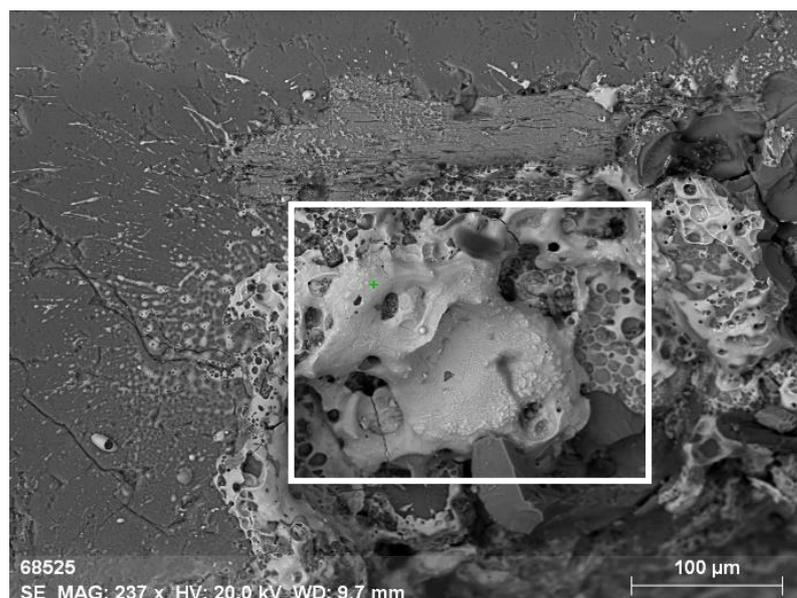
Гранит состоит из полевого шпата, кварца, плагиоклаза, темноцветных минералов с вкраплениями магнетита. Электрическая прочность горных пород связана с особенностями строения и естественной дефектностью. Наиболее важными, оказывающими значительное влияние на импульсную электрическую прочность, являются:

- микро – и макропоры и трещины,

- включения проводящих минералов, влияющие на эффективную толщину и глубину внедрения пробиваемой породы,

- жидкая среда [18]

В ходе осмотра межэлектродных областей было замечено, что после воздействия единичным импульсом напряжения на поверхности образцов, в местах прилегания электродов остаются их следы, имеющие механическую природу возникновения, о чем свидетельствуют снимки микроскопии (Рисунки 32, 33) и спектральный анализ следов (рисунок 34 б), в составе которого преобладает нержавеющая сталь – материал электродов.



а

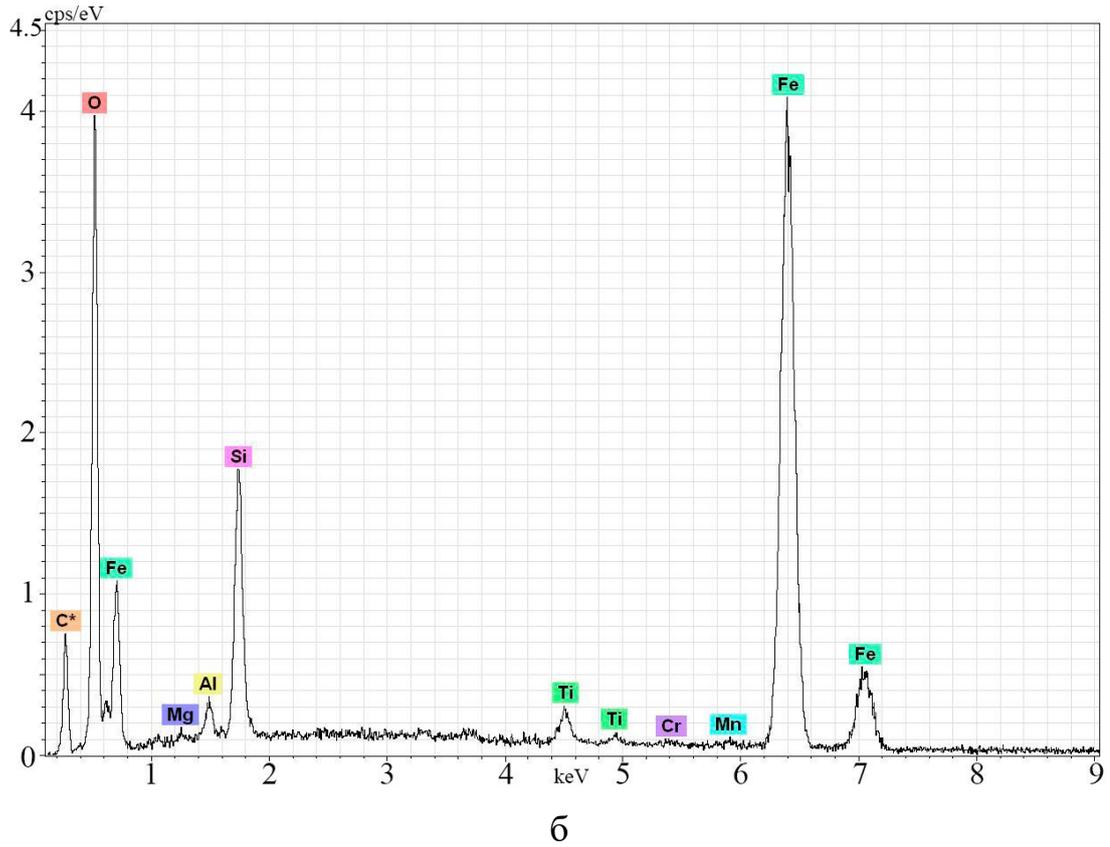


Рисунок 32 – Сканирующая электронная микроскопия образца гранита:
 а) снимок оплавленности кратера (места внедрения канала разряда); б) спектр
 оплавленного минерала

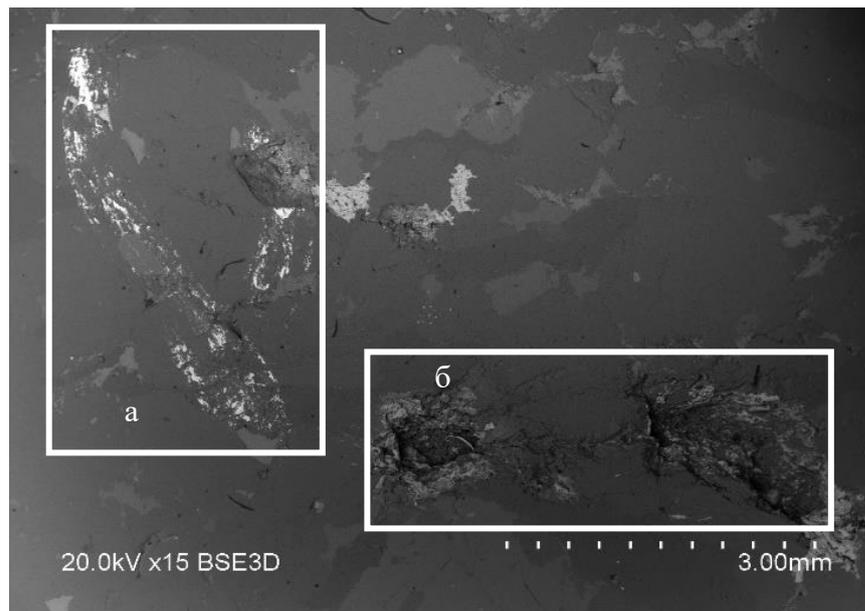


Рисунок 33 – Внешний вид следа электрода и места внедрения канала разряда:
 а) след электрода; б) место внедрения

Данное наблюдение может быть обосновано тем, что два электрически заряженных тела (два электрода) взаимодействуют между собой с некоторой силой, которая определяется по закону Кулона [120]

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{r^3} \cdot V_{1,2}, \quad (3.6)$$

где F – вектор силы, действующей между зарядами q_1 ; q_2 ; r – расстояние между зарядами; $V_{1,2}$ – вектор между зарядами, направленный от первого заряда ко второму. При зарядах разных знаков силы F и вектор V имеют разные знаки и заряды притягиваются. Сила притяжения равна [120].

$$F = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S \cdot E^2}{2}, \quad (3.7)$$

где E – напряженность электрического поля, S – площадь электродов, ε_0 – электрическая постоянная, ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

Механические усилия в диэлектрике, находящемся в электрическом поле высокой напряженности, могут быть значительными вплоть до разрушения диэлектрика при длительном воздействии.

В наших электродных системах электроды притягиваются друг к другу, скользя по поверхности гранита, но механически удерживаются на месте, оказывая давление – срез на гранит. Поскольку механическое воздействие длится доли микросекунды, то воздействие на гранит происходит в виде удара, что должно проявляться в виде нарушений поверхности гранита под электродом.

Также отмечено, что точки внедрения канала разряда в гранит располагаются со смещением относительно потенциальных электродов в сторону противоположных (заземленных) электродов на расстояние от 1 до 3 мм от места прилегания электродов к поверхности образца гранита (рисунок 34). Этот эффект является характерным при электроимпульсном внедрении канала разряда в твердые диэлектрики и горные породы. Он хорошо описан в работе [120] и обусловлен «запрещенной зоной», занятой объемным зарядом непосредственно вокруг электрода в которой отсутствует внедрение. В то же время, на участках

вблизи треков, трещин и каверн, возникших в результате воздействия канала разряда, наблюдаются оплавленные области плагиоклаза (вспененная поверхность), полевого шпата и кварца (Рисунок 35). При этом области, находящиеся между точками прилегания электродов к образцу гранита и местом внедрения, не имеют треков или следов оплавления поверхности образца.

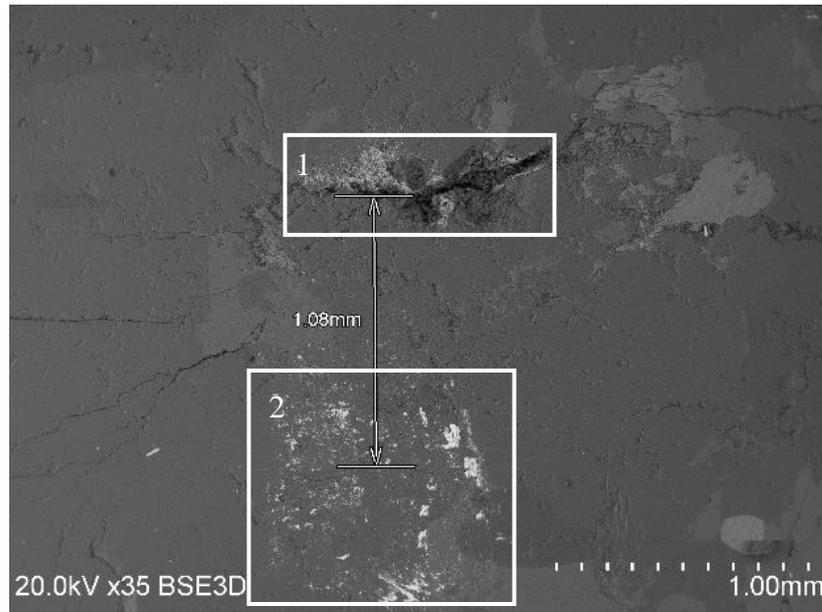


Рисунок 34 – Внешний вид области между следом электрода и внедрением канала разряда: 1 – зона внедрения; 2 – след электрода

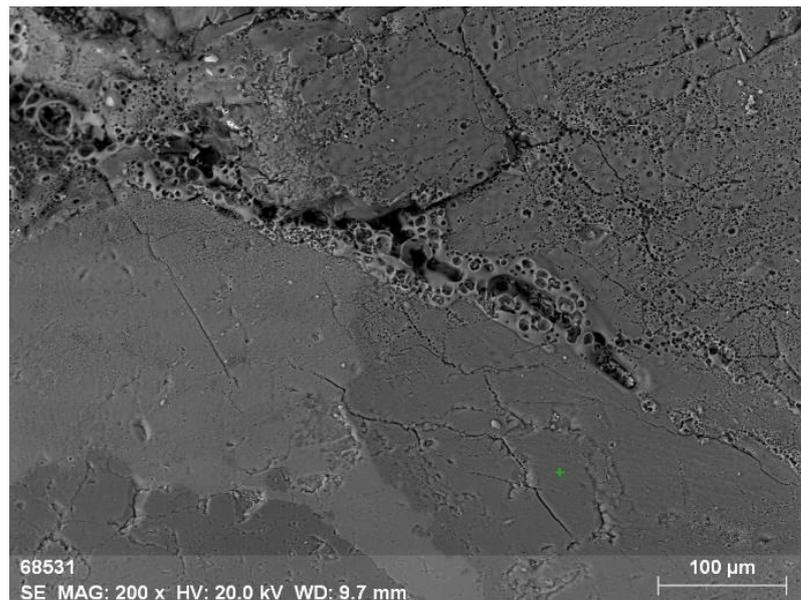


Рисунок 35 – Внешний вид оплавленных областей плагиоклаза, полевого шпата и кварца по траектории канала разряда между электродами

Анализ элементного состава оплавленных областей в местах внедрения канала разряда позволяет установить, что внедрение разряда в гранит происходит по проводящим включениям в горной породе, которыми является, как правило, магнетит. Данная закономерность наблюдается на всех исследованных образцах независимо от вида рабочей жидкости. Исходя из этого, можно утверждать, что вероятность внедрения разряда в гранит обусловлена также наличием микронеоднородностей электрического поля, вызванных проводящими включениями в породе, что и провоцирует зажигание разряда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленной целью показан способ снижения рабочего напряжения путем применения двуполярного импульса высокого напряжения в ЭИ технологиях, а также определена возможность организации многоканального пробоя и приведена оценка его эффективности в зависимости от вида жидкости и уровня напряжения.

Основные выводы выполненного исследования заключаются в следующем:

1. Установлена возможность осуществления электрического пробоя твердого диэлектрика (гранита) в нескольких межэлектродных промежутках за один импульс высокого напряжения в среде минерального масла, этиленгликоля, деионизованной воды и технической воды. Получены зависимости среднего количества внедренных каналов разряда за один импульс от величины напряженности электрического поля: с ростом напряженности электрического поля при прочих равных условиях, увеличение вероятности осуществления многоканального пробоя гранита наиболее характерно для этиленгликоля и минерального масла.

2. Эффект снижения пробивного напряжения при двуполярном воздействии импульсов характерен для всех диэлектрических сред – газ, жидкость, твердое тело. Реализация этого эффекта для ЭИ технологии позволит существенно, более чем в два раза, снизить рабочие напряжения как генераторов импульсов, так и высоковольтных передающих изоляционных систем от генераторов к нагрузке – рабочим электродным системам, которые, например, при бурении, могут быть удалены на сотни - тысячу метров друг от друга.

3. Установлено, что чем больше комплексное сопротивление проводов, соединяющих электроды ГИН, тем меньше объем разрушения при многоканальном пробое. Следовательно, это один из факторов, влияющих на производительность (объем) разрушения в ЭИ технологиях разрушения горных пород.

4. Установлено, что внедрению канала разряда в гранит способствует наличие магнетита, который вызывает локальное усиление электрического поля, что и провоцирует начало развития разряда в граните.

5. Разработана программа для численного моделирования многоканального пробоя. Составлена структурная карта гранита с использованием среза реального образца. Смоделирована картина распределения интенсивности касательных напряжений и давления.

6. Сконструирована система перемещения генератора в трех осях с дистанционным управлением, состоящая из двухуровневого подвижного металлического корпуса, привода и пульта управления. Данная система имеет широкий спектр настроек управления и может быть адаптирована под различные задачи связанные с изучением ЭРТ. Установка будет внедрена в учебный процесс и использована для проведения лабораторных работ при подготовке студентов бакалавров и магистров ОМ ИШНПТ.

7. Отработана электродная система, особенность которой заключается в наличии пяти равных межэлектродных промежутков, располагающихся в один ряд на поверхности образца. В ходе работы возникали проблемы, связанные с электрическим пробоем изоляции некоторых электродов. При соответствующем выборе габаритов и подборе материалов изоляции, ресурс электродной системы может быть увеличен. Электродную систему также планируется внедрить в учебный процесс для демонстрации и изучения эффекта многоканальности.

Настоящая работа является первой в области электроразрядных технологий по одновременному внедрению канала разряда в твердый диэлектрик за один импульс высокого напряжения. Полученные результаты исследования носят прикладной характер и являются важным дополнением для дальнейшей разработки и внедрения эффекта многоканальности в электроразрядные технологии.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

-
- 1 Е.Ф. Эпштейн, Э.И. Арш, Г.К. Виторт Новые методы разрушения горных пород. Госгортехиздат, 1960 г.
 - 2 С.С. Сулакшин Основы теории разрушения горных пород и удаления продуктов разрушения при бурении скважин. Учебное пособие. Изд-во ТРУ, Томск, 1964.- 246 с.
 - 3 А. Островский Новые процессы бурения глубоких скважин. Москва: Гостоптехиздат, 1960. - 188 с
 - 4 С.С. Сулакшин Современные способы разрушения горных пород при бурении скважин. Недра, МЛ: 1964.- 105 с.
 - 5 А.И. Спивак Механика горных пород. Изд-во: «Недра», 1964 г.
 - 6 А.В. Бричкин, А. Н. Генбач, П. Н. Чулаков Термическое бурение горных пород – М.: Огнестрой, 1958. – 88 с.
 - 7 М.М. Протодьяконов Состояние и пути развития теории отделения горных пород от массива // Разрушение углей и горных пород: Сб. статей. Под ред. А.М.Терпигорева и М.М.Протодьяконова.- М.: Углетехиздат., 1958.512 с.
 - 8 Б.И. Воздвиженский, А.А. Скорняков. Бурение взрывных скважин. Госгортехиздат, 1960 г.
 - 9 Ф.А. Шамшев Н.П. Киюнфером, Н.И. Николаевым, С.Н. Таракановым, Е.А. Салье Разведочное бурение, Госгортехиздат 1958 г.
 - 10 А.А. Воробьев, Г.А. Воробьев, Т.Ю. Могилевская, А.Т. Чепиков Бурение скважин с помощью искровых разрядов. А. с. 624999/22. Заявлено 08.04.1989.
 - 11 А. А. Воробьев Разрушение горных пород электрическими импульсными разрядами. – Томск: Изд-во ТГУ, 1961.–150 с
 - 12 А.Т. Чепиков Исследование разрушения горных пород импульсными электрическими разрядами: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Томск., 1961. 206 с

13 Торбин Н.М. Экспериментальное исследование процесса развития пробоя и разрушения диэлектриков на импульсном напряжении: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Томск., 1961. 210с.

14 Ю.Б. Фортес Исследование электроимпульсного бурения взрывных скважин: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Томск., 1964. 236 с.

15 И.И. Каляцкий Исследование технико-физических основ разрушения горных пород импульсными электрическими разрядами: Диссертация на соискание ученой степени докт. техн.наук. Томск., 1965. 419 с.

16 Б.В. Семкин Исследование физических основ и эффективности процесса электроимпульсного разрушения твердых тел: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Томск., 1966. 212 с.

17 Л.Л. Игнатенко Исследование электроимпульсной буримости горных пород и руд: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Томск., 1965. 262 с.

18 В.С. Малахов Исследование импульсной электрической прочности горных пород применительно к их разрушению электроимпульсным способом: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Томск., 1968. 196 с.

19 А.А. Киселев Исследование переходных процессов и разработка устройств формирования и коррекции высоковольтных импульсов при электроимпульсном бурении: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Томск., 1970. 168 с.

20 В.В. Багин Исследование электрической прочности диэлектриков применительно к изоляции высоковольтных наносекундных устройств: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Томск., 1970. 121 с.

21 Ш.Т. Кленин Исследование разрушающего воздействия электрического разряда при электроимпульсном бурении скважин: Диссертация на соискание ученой степени, канд. техн. наук. Томск., 1970. 240 с.

22 В.И. Брылин Разрушение горных пород и бурение скважин с применением в качестве промывочной жидкости воды прямоугольными импульсами напряжения с наносекундным фронтом: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Томск., 1972. 150 с.

23 Д.Д. Халилов Исследование электрофизических характеристик искрового канала в горных породах и анализ путей оптимизации устройств электроимпульсной технологии: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Томск., 1973. 140 с.

24 Ю.Ш. Леонтьев Исследование электрофизических параметров и разрушающего воздействия импульсного электрического разряда в твердых материалах: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Томск., 1975. 167 с.

25 Н.В. Седов Исследование основных показателей при разрушении горных пород высоковольтными прямоугольными импульсами с наносекундным фронтом: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Томск., 1975. 169 с.

26 Б.Г. Шубин Исследование термодинамических и гидродинамических характеристик канальной стадии импульсного электрического пробоя твердых диэлектриков: Диссертация на соискание ученой степени канд.- техн. наук. Томск., 1977. 188 с.

27 Т.И. Алексеева Исследование энергетических и технологических характеристик электроимпульсного дробления и измельчения твердых тел: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Томск., 1979. 233 с.

28 В.Т. Казуб Разработка электроимпульсной технологии очистки трубок опреснителей от накипи: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. Томск., 1983. 180 с.

29 В.В. Буркин Численное исследование взрывного воздействия при импульсном электрическом пробое твердых сред: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Новосибирск., 1987. 16 с.

30 Г.З. Усманов Стохастически-детерминистическое моделирование электроразрядного разрушения материалов: Диссертация на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук. Томск., 2009. 109 с.

31 Н.С. Кузнецова Моделирование электровзрывного разрушения твердых тел: Диссертация на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук. Томск., 2011. 170 с.

32 Патент RU 2083824 С1. Способ разрушения горных пород / Адам А.М., Важов В.Ф., Воробьев Г.А., Левченко Б.С., Семкин Б.В., Чепиков А.Т. Заявлено 13.06.1995. Опубл. 10.07.1997. Бюл. № 19.

33 Патент RU 2123596С1 Электроимпульсный способ бурения скважин и буровая установка / Адам А.М., Важов В.Ф. Заявлено 14.10.1996. Опубликовано 20.12.1998. Бюл. № 35.

34 Патент RU 2142562 С1 Электроимпульсный способ разрушения горных пород и искусственных материалов / Адам А.М., Важов В.Ф., Боев С.Г., Жгун Д.В., Левченко Б.С., Муратов В.М., Пельцман С.С. Заявлено от 04.11.1997. Опубликовано 10.12.1999.

35 Б.В. Семкин, А.Ф. Усов, В.И. Курец Основы электроимпульсного разрушения материалов. - Апатиты: КНЦ РАН, 1995 г, 276 с

36 W.C. Maurer Novelldrillingtechniques. QВ: Pergamon Press, 1968. – 110 p

37 С.С. Сулакшин Разрушение горных пород при бурении скважин. Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 136 с.

38 B.S. Aadnoy, I. Cooper, S.Z. Miska, R.F. Mitchell, M.L. Payne Advanced drilling and well technology. USA: Society of Petroleum Engineers, 2009. – 876 с.

39 Ю.И. Протасов Разрушение горных пород. – М.: Изд-во МГГУ, 2001. – 453 с.

40 М.А. Емелин, В.Н. Морозов, Н.П. Новиков и др. Новые методы разрушения горных пород. – М.: Недра, 1990–240 с.

41 Сырьевые ресурсы отрасли, охрана окружающей среды. Экспресс-информация ВНИИЭСМ. – 1987. – Сер. 20. Вып. 14.

42 Энциклопедия современной техники. Строительство / гл. ред. Г.А. Караваев. – Т. 2. – Изд-во: Советская энциклопедия, 1964. – 482 с.

43 Н.Т. Зиновьев, Б.С. Левченко, Б.В. Сёмкин, Ж.Г. Танбаев Утилизация некондиционных железобетонных изделий электроимпульсным способом // Электронная обработка материалов.- 1990, № 4.- С. 81-83.

44 Н.Т. Зиновьев Электроимпульсное разрушение некондиционного железобетона // Обогащение руд. 1989. N 4. С.43-45.

45 Г.А. Воробьев, Ю.П. Похолков, Ю.Д. Королев, В.И. Меркулов Физика диэлектриков – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 244 с.

46 В.Я. Ушаков, В.Ф. Климкин, С.М. Коробейников, В.В. Лопатин Пробой жидкостей при импульсном напряжении / Под ред. В.Я. Ушакова. - Томск: Изд-во НТЛ, 2005. - 488 с.

47 Г.И. Сканава Физика диэлектриков (область сильных полей), ч. 2. – М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры, 1958. – 907 с.

48 А.Ф. Усов, Б.В. Сёмкин, Н.Т. Зиновьев Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии. – СПб: Наука, 2000. – 160 с.

49 Ю.Н. Вершинин Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков. – Екатеринбург: Изд-во УрОРАН, 2000. – 259 с.190

50 В.И. Курец, А.Ф. Усов, В.А. Цукерман Электроимпульсная дезинтеграция материалов. – Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН, 2002. – 324 с.

51 А.А. Воробьев, Г.А. Воробьев Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. – М.: Высшая школа, 1966. – 224 с.

52 Ю.В. Торшин Физические процессы формирования электрического пробоя конденсированных диэлектриков. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 212 с.

53 Физика диэлектриков / под ред. А.Ф. Вальтера л. – М.: ГТТИ, 1932. – 560 с.

54 Ю.Н. Вершинин Электрический пробой твердых диэлектриков. – Новосибирск: Наука, 1968. – 211 с.

55 Е.В. Кривицкий Динамика электровзрыва в жидкости. – Киев: Наукова Думка, 1986. – 208 с.

56 В.Я. Ушаков Импульсный электрический пробой жидкостей. – Томск: Изд-во ТГУ, 1975. – 256 с.

57 Г.А. Воробьёв, Чепиков А.Т., Важов В.Ф. Критерий внедрения канала разряда в твердый диэлектрик, помещенный в изолирующую жидкость // Известия вузов. Физика. – № 12. 1998. – С. 110–113.

58 Г.А. Месяц О природе «Эффекта Воробьёвых» в физике импульсного пробоя твердых диэлектриков // Письма в ЖТФ. – Т. 31. – Вып. 24. 2005. – С. 51–59.

59 Г.А. Месяц Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. – М.: Наука, 2000. – 424 с.

60 I. Lisitsyn, H. Inoue, S. Katsuki, H. Ariyama, I. Nishizawa Drilling and demolition of rocks by pulsed power // 12IEEE International Pulsed Power Conference. USA, CA, Monterey. 1999. – P. 169–172.

61 I. Lisitsyn, H. Inoue, I. Nishizawa, S. Katsuki, H. Akijama, Breakdown and destruction of heterogeneous solid dielectrics by high voltage pulses // Journal of Applied Physics. 1998. – Vol. 84. – № 11. – P. 6262–6267.

62 H. Inoue, I. Lisitsyn, H. Akujama, I. Nishizawa, Drilling solid of hardrocks by pulsed power // IEEE Electrical Insulation Magazine. 2000. – Vol. 16. – № 3. – P. 19–25.

63 Г.А. Месяц // Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 57. В. 2. С. 88–90.

64 Л.А. Юткин Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Машиностроение, 1986. – 253 с.

65 А.И. Лимасов Исследование импульсной электрической прочности различных горных пород, изоляционных материалов и жидких сред, используемых при электроимпульсном разрушении твердых тел / дисс... канд. техн. наук. – Томск, 1965. – 260 с.

66 А.Т. Чепиков Исследование и разработка электроимпульсного способа бурения скважин / дисс... канд. техн. наук. – Томск, 1961. – 230 с.

67 Г.С. Кучинский Частичные разряды в высоковольтных конструкциях – Л.: Энергия, 1979. – 242 с.

68 С.Н. Койков, А.Н. Цикин Электрическое старение твердых диэлектриков. – Л.: Энергия, 1968. – 186 с.

69 В.Я. Ушаков Изоляция установок высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 496 с.

70 Г.М. Гордеев, А.Н. Перфилов Метод исследования электрической устойчивости в неоднородном поле непрозрачных полимеров // Известия вузов. Энергетика. 1966. – № 10. – С. 96–98.

71 M. Ieda, M. Nawata DC treeing breakdown associated with space charge formation in polyethylene // IEEE Conf. Rec. Int. Symp. Elec. Insul. – Montreal, 1976. – P. 201–204.

72 F. Noto, N. Yoshimizu, M. Nishida Tree growth in polyethylene by applying dc and impulse voltage // IEEE Conf. Rec. Int. Symp. Elec. – Philadelphia, 1978. – P. 126–128.

73 T. Tanaka, A. Greenwood Effect of charge injection and extraction on tree initiation in polyethylene // IEEE Trans. Power. Appar. and Syst. 1978. – V. 97. – № 5. – P. 1749–1759.

74 Г.А. Воробьев, В.С. Королёв Исследование наносекундного пробоя полимеров // Журнал технической физики. 1976. – Т. 46. – Вып. 10. – С. 2088–2093.

75 А.А. Воробьев, Г.А. Воробьев, Е.К. Завадовская, И.И. Каляцкий, В.В. Кривко, В.Ф. Панин, Б.В. Семкин, Н.М. Торбин, В.Я. Ушаков, А.Т. Чепиков Импульсный пробой и разрушение диэлектриков и горных пород. – Томск: Изд-во ТГУ, 1971. – 226 с.

76 Б.В. Семкин, В.С. Королёв О механических аспектах электрического пробоя твердых диэлектриков // Известия вузов. Физика. 1972. – № 9. – С. 127–130.

77 В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский Кинетическая природа прочности твёрдых тел. – М.: Наука, 1974. – 560 с.

78 А.А. Воробьёв Теория механоэлектрических преобразований в твердых диэлектриках / Деп. ВИНТИ № 3290-78 Деп., 1978. – 40 с.

79 М.А. Грейсх, Г.С. Кучинский, Д.А Каплан, Г.Т. Мессерман Бумажно-масляная изоляция в высоковольтных конструкциях. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 300 с.

80 Б.Б. Назруллаев, Н.Г. Квачадзе, Э.Е. Томашевский, А.И. Слуцкер Прочность полимеров, содержащих свободные макрорадикалы // Физика твердого тела. 1981. – Т. 23. – С. 429–433.

81 Исследование электрической прочности диэлектрических сред и создание устройств и элементов генерирования импульсов высокого напряжения / научно-техн. отчет НИИ ВН при ТПИ. ГР № 80042369. Научн. рук. В.Я. Ушаков. – Томск, 1981. – Т. 2. – 203 с.

82 А.Ф. Иоффе Физика кристаллов. – М.: Госиздат, 1929. – 192 с.

83 В.С. Дмитриевский Физические основы надежности полимерной изоляции // Сборник трудов «Материалы радиоэлектроники». – М.: Изд-во МИРЭА, 1975. – Вып. 74. – С. 70–76.

84 E. Koyanagi Degradation of composite materials // IEEE Conf. Rec. Int. Sym. Elec. Insul. – Philadelphia, 1978. – P. 27–32.

85 H. Nakayama, R. Nakanishi, S. Hirabayashi Treeig in epoxy resins // IEEE Conf. Rec. Int. Elec. Ins. – Philadelphia, 1978. – P. 137–139.197

86 А.А. Воробьёв Электромагнитное излучение в процессе образования трещин в диэлектрических телах // Дефектоскопия. 1977. – № 3. – С. 128–129.

87 В.Ф. Важов Исследование многоимпульсной прочности полиэтиленовой изоляции / дисс... канд. техн. наук. – Томск, 1974. – 199 с.

88 В.Ф. Важов, В.С. Дмитриевский, И.И. Сквирская, В.Г. Сотников, Ю.Б. Фортес Разработка технологии изготовления полиэтиленовых изоляторов // Тезисы

Межвузовской научно-технич. конф. по электрофизическим методам разрушение горных пород. – Томск: изд. ТПИ, 1967. – С. 31–33..

89 В.Ф. Важов, В.С. Дмитриевский Некоторые вопросы многоимпульсной прочности полиэтилена в коаксиальной системе электрода // Тезисы докладов «Ионизационное разрушение, короностойкость и электрическая прочность органической изоляции радиоэлектронного оборудования. – Киев: Изд-во КПИ, 1969. – С. 42–43.

90 В.Ф. Важов Надежность работы ПЭ изоляции применительно к электроимпульсным буровым снарядам / научно-технич. отчет НИИ ВН при ТПИ. Инв. № 229. – Томск, 1973. – 34 с.

91 В.Ф. Важов, В.С. Дмитриевский Исследование отказов полиэтиленовой изоляции при импульсном напряжении // Электричество. – № 5. 1970. – С. 88–89.

92 В.Ф. Важов, Е.В. Петренко Объемный заряд в полимерных диэлектриках при воздействии импульсного и постоянного напряжений как фактор, влияющий на время до пробоя // Физика твердого тела / Российская академия наук ; Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе . — 2021 . — Т. 63, № 5 . — [С. 617-621]

93 Исследование возможности применения жидкостей на нефтяной основе при электроимпульсном бурении / Р.Э. Клейн, Н.Ф. Побежимов, А.П. Проскурин и др. // Сборник докладов Кольского филиала АН СССР, 1967. – С. 54–58

94 Лимасов А. И. Исследования пробоя горных пород при импульсном воздействии напряжения / А. И. Лимасов, А. Т. Чепиков // В кн.: Пробой диэлектриков и полупроводников. – М.: Энергия, 1964. – С. 176-179.

95 Roberts, D. K. And Wells, A. A., “The Velocity of Brittle Fracture,”*Engineering*,178,820 (1954).

96 А.В. Астафуров Исследование электрического пробоя некоторых твердых диэлектриков в больших толщинах. Кандидатская диссертация. Фонды Томского политехнического ин-та, г. Томск. 1958 г.

97 Н.И. Куличихин, Б.И. Воздвиженский. Разведочное бурение (М: Недра, 1973), с. 440.

98 Ю.И. Кузнецов, В.Ф. Вазов, М.Ю. Журков. Электрический пробой твердых диэлектриков и горных пород на спаде импульса напряжения (Известия вузов. Физика, 2011), №4, с. 17 – 22.

99 Протопопов И. А. Разработка изолированной электродной системы для электроимпульсных технологий : магистерская диссертация / И. А. Протопопов ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Инженерная школа новых производственных технологий (ИШНПТ), Отделение материаловедения (ОМ) ; науч. рук. А. С. Юдин. — Томск, 2019.

100 И. П. Кужекин Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. – Л. : Энергия, 1980. – 136 с.

101 Ашнер, А. М. Получение и измерение импульсных высоких напряжений / А. М. Ашнер ; пер. с нем. – М. : Энергия, 1979. – 120 с.

102 Импульсные системы большой мощности. / Сб. статей под редакцией Асиновского Э.И. // Издательство «Мир», Москва, 1981.

103 М.Л. Уилкинс Расчет упругопластических, течений // Вычислительные методы в гидродинамике / М.: Мир, 1967. С.212-263

104 М. Уилкинс, С. Френч, М. Сорем Конечно-разностная схема для решения задач, зависящих от трех пространственных координат и времени// Численные методы в механике жидкостей. Мл Мир, 1973. С. 115-119

105 Л.И. Седов Об уравнениях инерциальной навигации с учетом релятивистских эффектов, Докл. АН СССР, 231:6 (1976), 1311–1314

106 Тимошенко С.П. Теория упругости. М.: "Наука". 1979

107 Хан Х. Теория упругости: Основы линейной теории и ее применения. М.: Мир. 1988. 344 с

108 Коваленко А. Д. Основы термоупругости. Киев: «Наукова думка». 1970. 309 с

109 V.Ya. Ushakov, V.F. Vazhov, N.T. Zinoviev. Electrodischarge Technology for drilling wells and concrete distruction (Springer Nature Switzerland A.G., 2019), p. 261.

110 Ю.В. Корицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. Справочник по электротехническим материалам (М. Энергия, 1974) т. 1, с. 583.

111 Д.В. Разевиг, Л.Ф. Дмоховская, В.П. Ларионов. Техника высоких напряжений, под ред. проф. Д.В. Разевига. (М.Л., Энергия, 1964) с. 472.

112 Г.Н. Александров, Е.М. Рудаков. Исследование влияния параметров атмосферного воздуха на разрядные напряжения длинных воздушных промежутков. Пробой диэлектриков и полупроводников (М. Энергия, 1964) с. 44–49.

113 А.П. Александров, А.Ф. Вальтер, Б.М. Вул и др. Под ред. А.Ф. Вальтера. Физика диэлектриков (М-Л: ГТТИ, 1932) с. 560.

114 В.Ф. Важов, Н.В. Козлова. Импульсный электрический пробой воды и гранита (Электричество, 2012) №6, с. 73–76.

115 Э.М. Базелян, И.М. Ражанский. Искровой разряд в воздухе (Новосибирск, Наука, 1988) с. 103.

116 Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика) [Текст] : Справочник геофизика / [М. Ш. Магид, Г. М. Авчян, Н. Б. Дортман и др.] ; Под ред. д-ра геол.-минерал. наук Н. Б. Дортман. - Москва : Недра, 1976. - 527 с.

117 Ерофеев Л.Я., Вахромеев Г.С., Зинченко В.С., Номоконова Г.Г. Физика горных пород. – Томск: ТПУ, 2006. – 520 с.

118 Майчен Дж., Сак С. Метод расчета «Тензор» // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир. 1967. С. 185–211.

119 Johnson G.R., Beissel S.R. Damping algorithms and effects for explicit dynamics computations // Int. J. of Impact Engineering. 2001. V. 25. P. 911–925.

120 Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. М: Энергия, 1973. – 328 с.