

**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**



На правах рукописи

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Петренко Евгений'.

Петренко Евгений

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

2.4.4 – Электротехнология и электрофизика

Томск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Пушкарев Александр Иванович

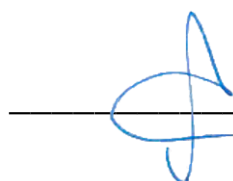
Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Коваль Николай Николаевич
Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск
доктор технических наук, профессор
Соковнин Сергей Юрьевич
Институт электрофизики УрО РАН, г. Екатеринбург

Защита состоится 18 мая 2023 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.19 на базе ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова 7, 8 корпус ТПУ, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 53а, и на сайте: <http://dis.tpu.ru/>.

Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
диссертационного совета
ДС.ТПУ.19 к. т. н.



Ивашутенко А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Научная область, к которой относятся материалы, изложенные в диссертационной работе – исследование электроимпульсного разрушения твердых диэлектриков (горных пород). Работа посвящена исследованию пробоя твердых горных пород под слоем жидкости в системе наложенных электродов в нескольких межэлектродных промежутках за один импульс напряжения в условиях однополярного и двухполярного импульса.

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 аппаратурном 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 определяются 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 увеличить 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 важных 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 В.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 вечномерзлых 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 электропроводящих включений в состав породы (магнетит), 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 многоззорная 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 проводящих включений (магнетит), который вызывает локальное усиление электрического поля, что и провоцирует начало развития разряда в граните.

Степень достоверности

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.

Апробация результатов работы.

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.

Публикации. По результатам исследований по теме диссертации опубликовано 4 статьи в журналах, индексируемых Scopus и Web of Science, 3 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК и 6 в сборниках материалов конференций.

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 представлены доклады на конференциях.

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, показана степень разработанности темы, определена цель исследований и задачи, решение которых необходимо для её достижения, сформулирована научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлена степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе представлена краткая история зарождения и развития электроразрядных технологий. Показаны основные закономерности и механизмы пробоя твердых и жидких диэлектриков в зависимости от различных факторов. Представлены особенности электроимпульсного способа разрушения твердых диэлектриков, а также их сравнение с традиционными способами механического разрушения. Рассмотрены основные гипотезы, объясняющие механизм внедрения разряда в твердый диэлектрик. Отражен ряд основных проблем, препятствующих внедрению технологии в промышленность и нуждающихся в решении. На основании проведенного анализа сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе приведено описание методики и средств эксперимента. В качестве образцов горных пород использовались песчаник и гранит. Размеры образцов песчаника составляли 150x100x50 мм, а гранита - 300x80x30 мм. 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 . Также были рассчитаны производительность разрушения и средняя напряженность электрического поля.

В опытах по разрушению горных пород импульсами разной полярности использовались два стержневых электрода, расположенных на одной поверхности образцов горных пород, каждый из которых подключался к отдельному ГИН. Пробой воздуха осуществлялся в слабонеоднородном поле между шаровыми разрядниками диаметром 12.5 мм. В качестве источника импульсов напряжения использовались два синхронизированных генератора по схеме Аркадьева - Маркса платформенного типа и состоящие из пяти ступеней (Рисунок 1).

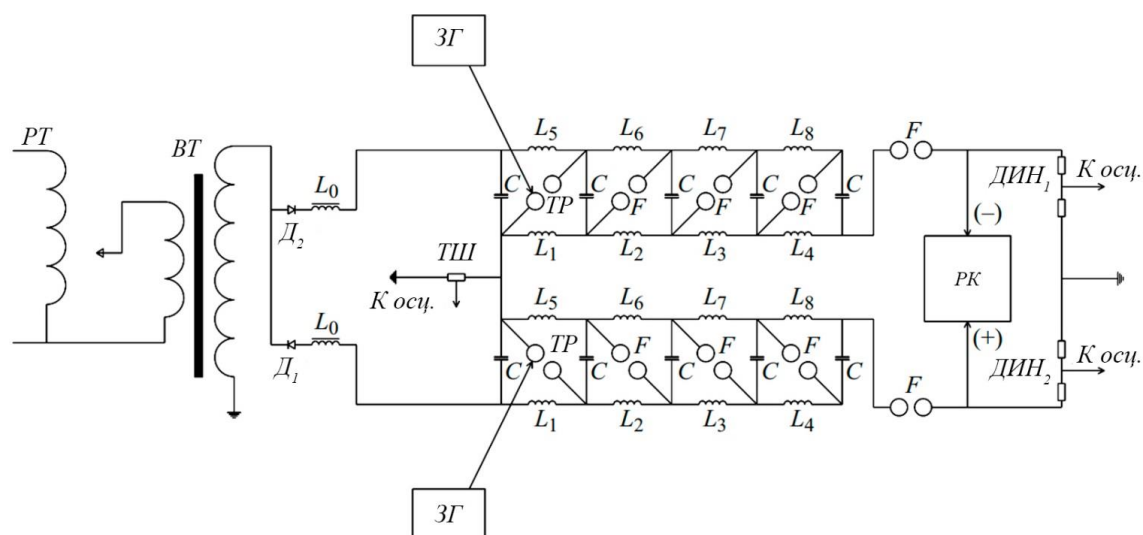


Рисунок 1. Схема замещения испытательной установки

РТ – регулировочный трансформатор; ВТ – высоковольтный трансформатор; L_0 – зарядные дроссели; 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.

В экспериментальных исследованиях по многоканальному электрическому пробую в качестве источника импульсов был использован импульсный генератор EG-350, который в отличие от используемых нами генераторов Аркадьева-Маркса обеспечивает большее выходное напряжение (350-400 кВ), а запасенная энергия генератора составляет ~600 Дж. Опыты многоканального пробоя горных пород в условиях двуполярного и однополярного импульса осуществлялись с помощью электродной системы (ЭС), состоящей из шести стальных электродов диаметром 6 мм, жестко закрепленных двумя полиэтиленовыми пластинами и имеющих четырехслойную изоляцию из силиконовой резины. ЭС подключалась к генератору EG-350 и устанавливалась на поверхность образца.

В качестве средств измерения в экспериментах с двуполярным импульсом напряжения использовались два малоиндуктивных омических делителя и токовый шунт, а в экспериментах по многоканальному пробую напряжение измерялось емкостным компенсированным делителем импульсных напряжений, встроенным в генератор EG-350. Регистрация сигналов производилась с помощью осциллографа Tektronix TDS3032B

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.

Для определения вида минеральных включений, имеющих различные электрофизические характеристики и влияющих на траекторию канала разряда в граните, была произведена сканирующая электронная

микроскопия 18 образцов гранита после воздействия импульсным высоким напряжением.

В третьей главе представлены экспериментальные результаты по пробую различных диэлектрических сред (газ, жидкость, твердое тело) двуполярным импульсом напряжения (таблица 1).

Таблица 1. Характеристики двуполярного импульсного пробоя различных 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 [8]	1,18	10—20	[14]
	30	205	0,31	263 [8]	1,28		
Гранит	20	248	0,24	306 [8]	1,23		
	30	290	0,39	316 [9]	1,1		
	50	320	1,8	362 [9]	1,14		
Вода	15	290	0,38	360 [10]	1,24		
Воздух	64	172	0,15	216 [11]	1,25	3—3,16	[15,16]
	75	219	0,18	244 [12]	1,12		
	97	236	0,19	270 [12]	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 двуполярном $U_{np\Sigma}$ потенциальных электродах.

Из таблицы видно, что в экспериментах по пробую песчаника снижение $U_{np\Sigma}$ достигает 28% по сравнению с литературными данными для близких условий испытаний с однополярным ГИН. Эксперименты по пробую гранита показали, что снижение суммарного пробивного напряжения при воздействии на образцы гранита двуполярного импульса напряжения достигает 23%. Сравнение полученных результатов экспериментов по пробую технической воды и воздуха с литературными данными показывает, что воздействие двуполярного импульса вызывает снижение пробивного напряжения до 24% и до 25%, соответственно. 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.

Данные исследования показали, что эффект снижения пробивного напряжения при двуполярном воздействии импульсов характерен для всех диэлектрических сред – газ, жидкость, твердое тело.

Во второй части третьей главы представлены результаты по многоканальному разрушению горных пород (песчаника и гранита) двуполярным импульсом напряжения. В опытах с песчаником (рисунок 2) в

условиях технической воды количество одновременно внедренных каналов разряда в образец, сопровождающихся отколом, варьируется от 2 до 3.

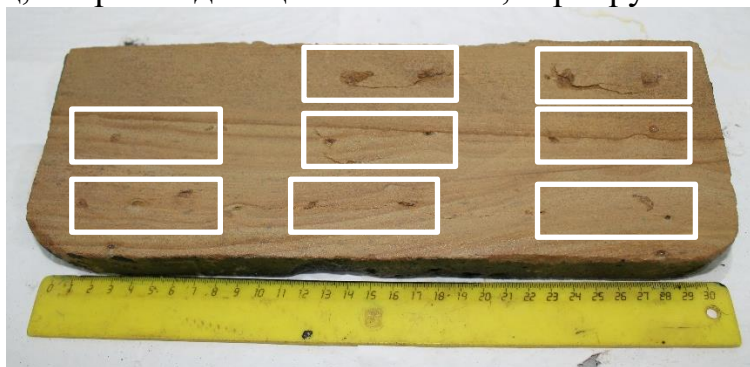


Рисунок 2. Образец песчаника со следами внедрения и откола после одного импульса напряжения в среде технической воды при разном расположении электродной системы

В опытах с гранитом (рисунок 3) в среде минерального масла количество одновременно внедренных каналов разряда в образец, сопровождающихся отколом, варьируется от 3 до 4.

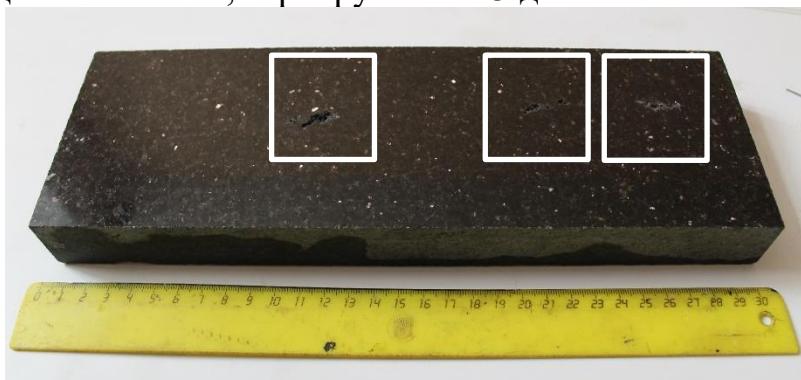


Рисунок 3. Образец гранита со следами внедрения и откола после одного импульса напряжения в среде минерального масла

По результатам эксперимента показана возможность осуществления пробоя горной породы в нескольких межэлектродных промежутках за один импульс напряжения в среде трансформаторного масла и технической воды при воздействии двуполярного импульса напряжения. Однако, из-за отсутствия технической возможности обеспечения пробоя гранита при различных уровнях напряжения эксперименты проведены с использованием генератора EG-350 в качестве источника импульсов.

В третьей части третьей главы представлены экспериментальные результаты по многоканальному пробоя и разрушению гранита однополярным импульсом напряжения (таблица 2). Исследования проводились 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.

Таблица 2. 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
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 2 видно, что по мере снижения уровня напряжения количество одновременно образовавшихся каналов внедрения (N), общий объем разрушения ($V_{общ.}$) и производительность разрушения (Q) снижаются во всех исследованных жидкостях. Следует отметить, что цикл опытов в среде технической воды является незавершенным по причине существенных потерь энергии и отсутствия технической возможности обеспечить напряжение разряда выше имеющегося (284 кВ). Тем не менее для технической воды при данном уровне напряжения были зафиксированы пробои одновременно в двух межэлектродных промежутках.

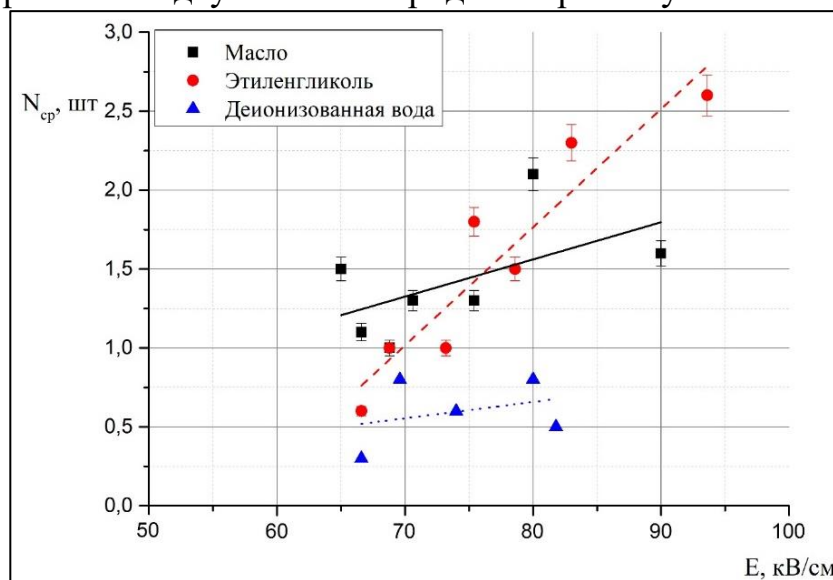


Рисунок 4. Зависимость среднего количества внедренных каналов от напряженности электрического поля

На рисунке 4 приведены результаты опытов, где представлена зависимость 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.

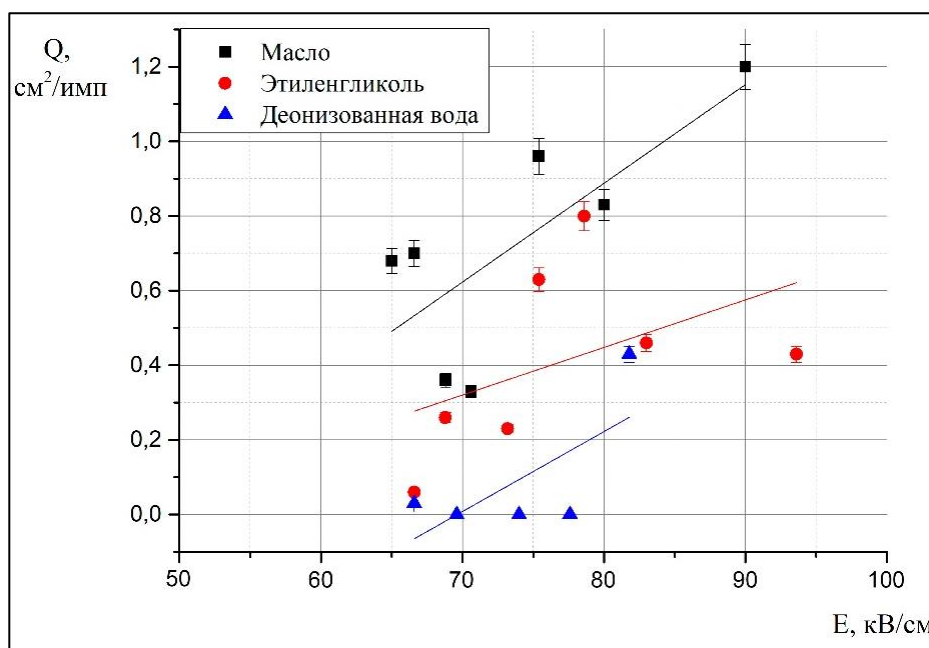


Рисунок 5. Зависимость производительности разрушения от напряженности электрического поля

Зависимость производительности разрушения гранита от средней напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке показана на рисунке 5. Из него следует, что с увеличением средней напряженности электрического поля производительность разрушения гранита во всех использованных жидкостях увеличивается. Наибольшая производительность в экспериментах соответствует разряду в масле. Уменьшение производительности разрушения в воде обусловлено в первую очередь уменьшением энергии в канале разряда из-за потерь в предпробивной стадии, а в этиленгликоле снижение связано с перераспределением энергии импульса в большее количество каналов. Тем не менее в каждой из исследованных жидких сред наблюдалось одновременное внедрение каналов разряда в образец гранита за один импульс напряжения хотя и с разной степенью эффективности, что подтверждает возможность формирования многоканального пробоя.

Эксперименты показали, что при равном энергокладе в импульс 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. В то же время при данном подходе наблюдается одновременное разупрочнение большей площади поверхности горной породы, что может нивелировать потери эффективности единичного канала разряда и быть выгоднее, например, при комбинированных (электромеханических) способах разрушения и при снятии поверхностного слоя материала.

В четвертой части третьей главы представлены результаты численного моделирования процесса разрушения и роста трещин под действием электрического разряда. Моделирование посвящено

исследованию процессов волновой динамики, нарушению сплошности и роста трещин в граните в зависимости от количества одновременных внедрений канала разряда (многоканального пробоя) при заданном уровне энерговыклада.

Для численного моделирования процесса роста трещин в граните под действием канала разряда и получения правдоподобной картины распределения интенсивности касательных механических напряжений и давления была создана реалистичная структурная карта мезообъема гранита (рисунок 6).

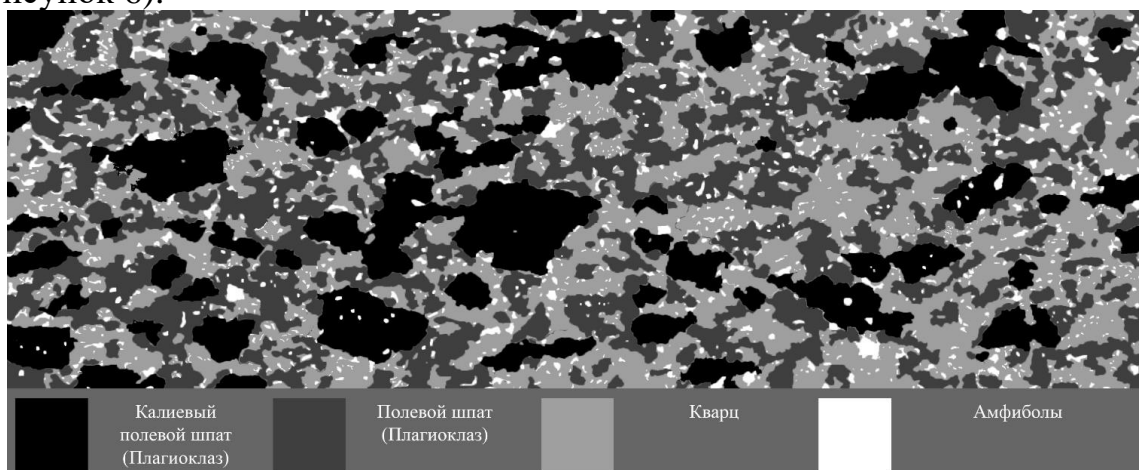


Рисунок 6. Структурная карта моделируемого образца гранита

Данные о физико-механических свойствах основных структурных компонентов (кварца, плагиоклаза и слюд – биотита и/или мусковита, магнетита) заимствованы из литературных источников.

На полученной структурной карте гранита была проведена серия численных экспериментов и рассмотрено 3 случая, соответствующих образованию 1, 3 и 5 каналам разряда. В рамках представленной модели, траектории разрядов задавались до моделирования разрушения и предполагалось, что в процессе они не меняют своей геометрии, а воздействие разрядного канала задается посредством импульса давления в канале.

Результаты моделирования (рисунки 7а, 8а, 9а) показывают, что во всех трех случаях происходит нарушение сплошности гранита под действием каждого канала разряда, при этом трещины вблизи поверхности развиваются с разной интенсивностью. Кроме этого, трещины зарождаются на глубине под электродами, что соответствует местам пересечения отраженных от поверхности волн растяжения. На рисунках 7-9 (б, в) также представлены картины распределения интенсивности касательных напряжений и давления.

На рисунках 7-9 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 $\approx 90\%$. При 3 каналах разряда охват составляет $\approx 75\%$

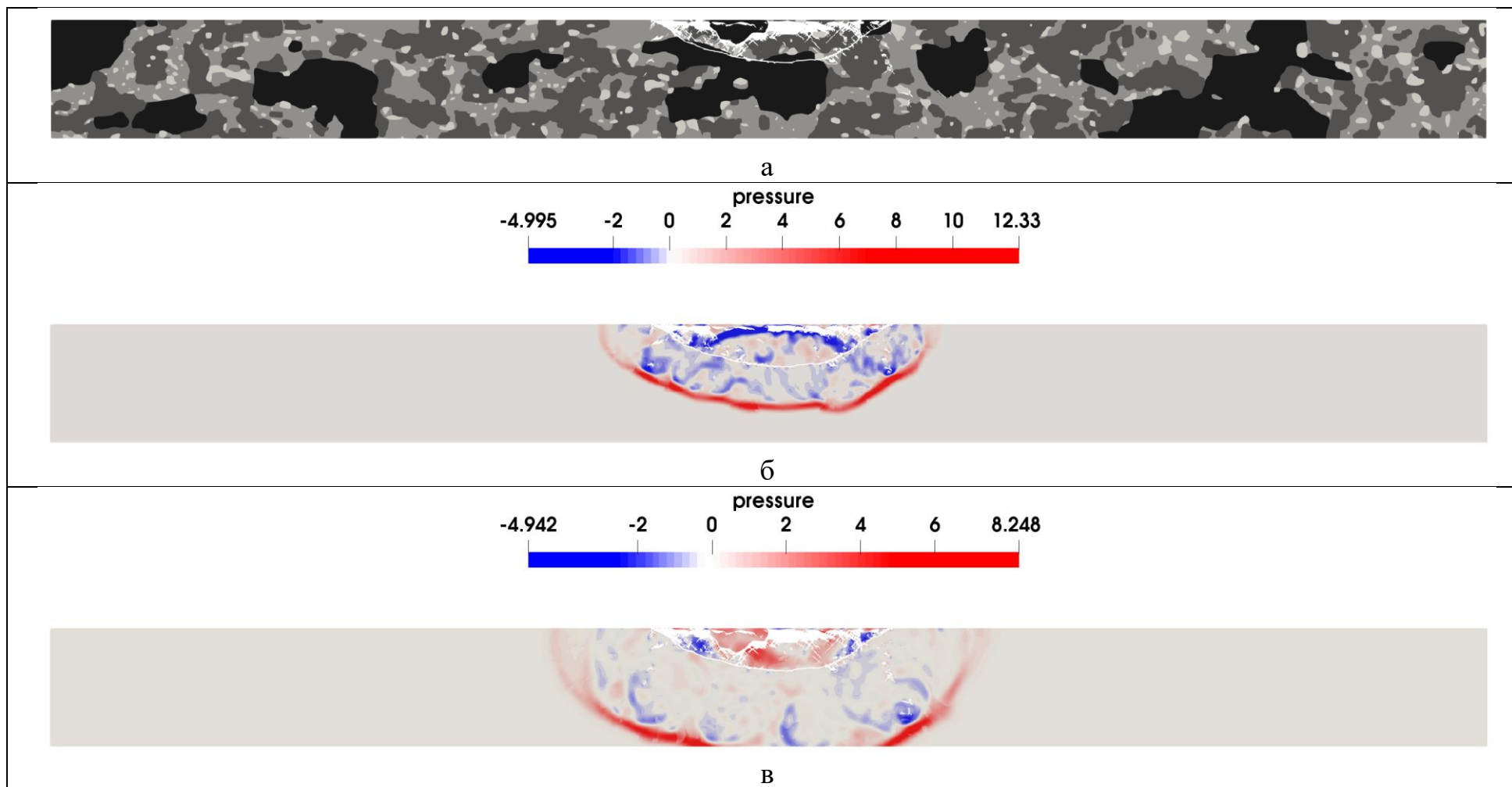


Рисунок 7. Смоделированная картина волновой динамики при возникновении одного канала разряда в образце: а) Распределение трещин отрыва; (б, в) Распределение давления в момент полного отражения волны растяжения от поверхности образца

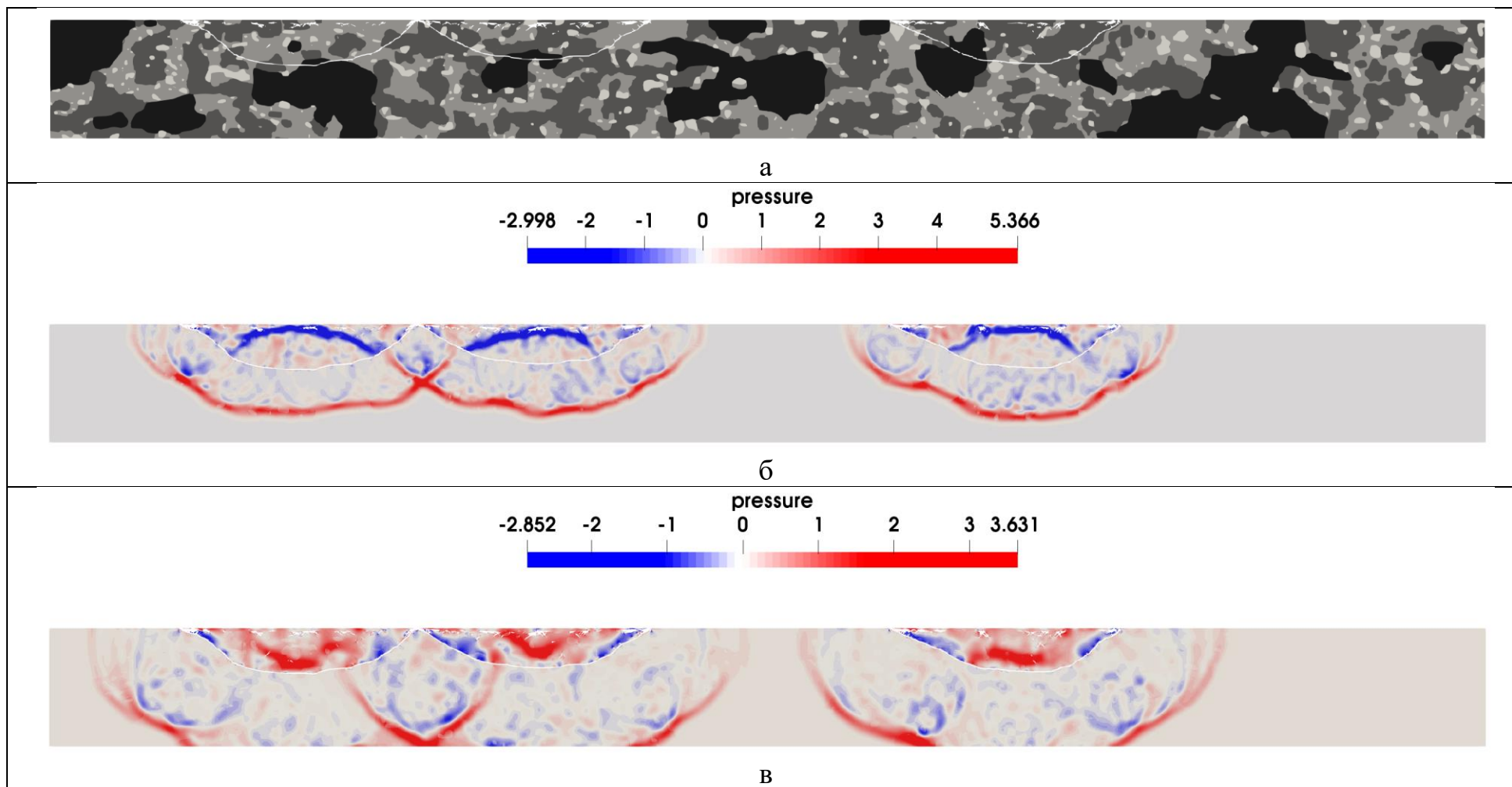


Рисунок 8. Смоделированная картина волновой динамики при возникновении трех каналов разряда в образце: а) Распределение трещин отрыва; (б, в) Распределение давления в момент полного отражения волны растяжения от поверхности образца

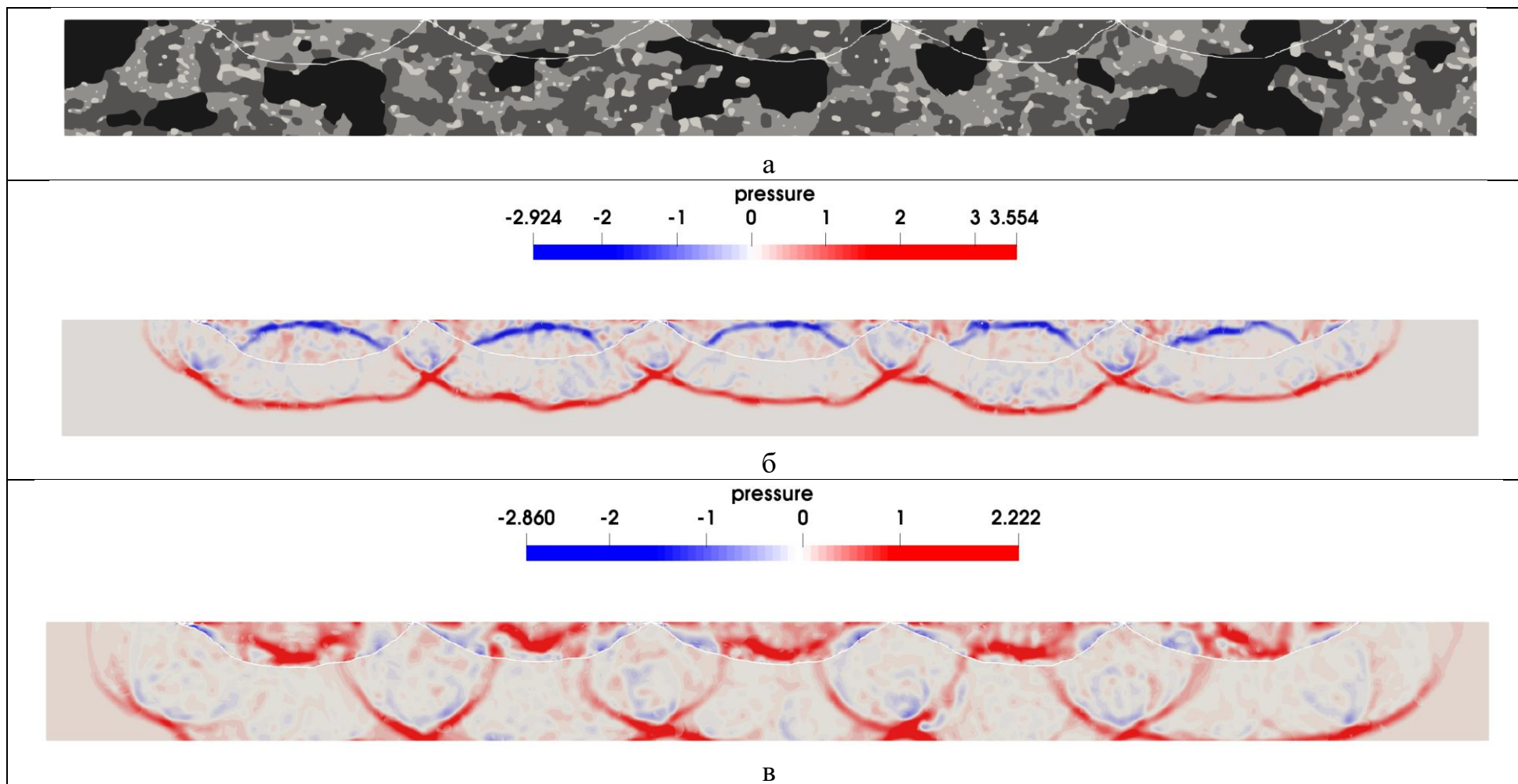


Рисунок 9. Смоделированная картина волновой динамики при возникновении пяти каналов разряда в образце: а) Распределение трещин отрыва; (б, в) Распределение давления в момент полного отражения волны растяжения от поверхности образца

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

В пятой части третьей главы приведен анализ результатов электронной микроскопии образцов гранита после воздействия на них импульсным высоким напряжением в различных жидких средах. В ходе микроскопии межэлектродных областей было замечено, что после воздействия единичным импульсом напряжения на поверхности образцов в местах прилегания электродов остаются их следы, имеющие механическую природу, о чем свидетельствуют снимки микроскопии (Рисунок 10а) и спектральный анализ следов, в составе которого преобладает нержавеющая сталь – материал электродов.

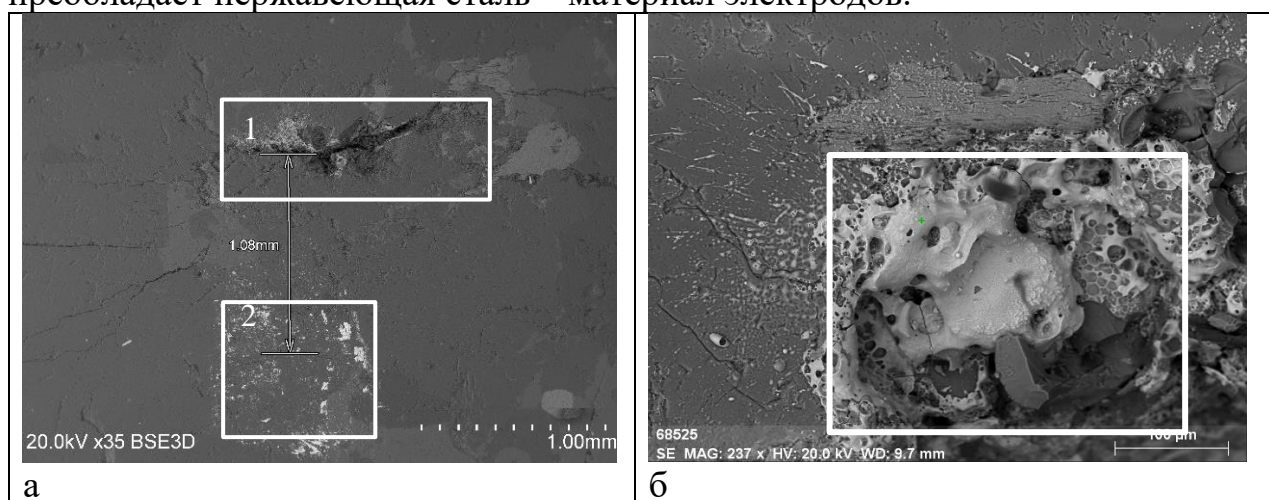


Рисунок 10. Внешний вид области между следом электрода и внедрением канала разряда: 1 – зона внедрения; 2 – след электрода

Также установлено, 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 10а). При этом области, находящиеся между точками прилегания электродов к образцу гранита и местом внедрения, не имеют треков или следов оплавления поверхности образца. Этот эффект является характерным при электроимпульсном внедрении канала разряда в твердые диэлектрики и горные породы и обусловлен «запрещенной зоной», занятой объемным зарядом непосредственно вокруг электрода, в которой отсутствует внедрение.

Анализ элементного состава оплавленных областей в местах внедрения канала разряда (Рисунок 10б) позволяет установить, что внедрение разряда в гранит происходит по проводящим включениям в горной породе, которыми являются, как правило, разновидности магнетита. 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 инициирует зажигание разряда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе выявленных зависимостей пробоя твердых горных пород под слоем жидкости в системе наложенных электродов в нескольких межэлектродных промежутках за один импульс напряжения предложен способ снижения рабочего напряжения путем применения двуполярного импульса высокого напряжения и дано новое решение актуальной научно-технической проблемы повышения эффективности и надежности работы систем и устройств электроимпульсного разрушения за счет организации многоканального пробоя, что обеспечит более высокую эффективность в технологиях разрядно-механического бурения и снятия поверхностного слоя материала.

Основные выводы и результаты 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 – газов, жидкостей, твердых тел. 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 внедрению канала разряда в гранит способствует наличие магнетита, который вызывает локальное усиление электрического поля, что и инициирует начало развития разряда в граните.

4. Создана структурная карта гранита с использованием среза реального образца. Смоделирована картина распределения интенсивности касательных напряжений и давления.

5. 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 бакалавров и магистров Ом ИШНПТ.

6. Отработана электродная система, особенность которой заключается в наличии пяти равных межэлектродных промежутков, располагающихся в один ряд на поверхности образца. 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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus

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. — 181 – 182с.

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. 173 – 174с.

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. – 205 p.

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. – 444 стр.