

На правах рукописи

ВАЖОВ Владислав Фёдорович



**РАЗВИТИЕ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ
ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО БУРЕНИЯ И РЕЗАНИЯ
ГОРНЫХ ПОРОД**

Специальность 05.14.12 – Техника высоких напряжений

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук**

Томск 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный консультант профессор, доктор технических наук, Заслуженный деятель науки и техники РФ **Ушаков Василий Яковлевич**

Официальные оппоненты:

Никифоров Михаил Георгиевич доктор технических наук, профессор, Истринский высоковольтный научно-исследовательский центр – филиал Федерального государственного унитарного предприятия Всероссийского электротехнического института, г. Истра, начальник отделения «Импульсных электромагнитных воздействий»;

Горелов Валерий Павлович доктор технических наук, профессор, Новосибирская государственная академия водного транспорта, г. Новосибирск, профессор кафедры «Электроэнергетические системы и электротехника»;

Овсянников Александр Георгиевич доктор технических наук, профессор, Новосибирская специализированная производственная база – филиал ОАО «Электросетьсервис Единая национальная электрическая сеть», зам. директора по науке, г. Новосибирск.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «**Институт сильноточной электроники**» Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск.

Защита состоится «18» февраля 2015г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.269.10 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте:

<http://portal.tpu.ru/council/2800/worklist>

Автореферат разослан

27 ноября 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Кабышев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В 1961 г. в Томском политехническом университете предложен принципиально новый способ разрушения твёрдых диэлектрических и полупроводящих материалов в жидкой среде названный электроимпульсным (ЭИ) способом. На его основе разработаны и разрабатываются технологии и технические средства для электроимпульсного бурения скважин, резания горных пород, поверхностной обработки камня, дробления и измельчения руд, утилизации бетонных и железобетонных изделий и др.

В мире постоянно возрастает объём разведочного и промышленного бурения скважин различного назначения. Проблемами механического бурения являются низкие скорости проходки скважин, низкая надёжность и срок службы рабочих инструментов (буровых наконечников), особенно при бурении крепких и очень крепких горных пород. Особой проблемой является проходка скважин большого диаметра (более 300 мм). Традиционные способы бурения практически исчерпали возможности существенного увеличения производительности (скорости) бурения. Поэтому в мире происходит поиск принципиально новых способов бурения. Одним из таких принципиально новых методов является электроимпульсный способ бурения скважин, который основан на разрушении горных пород при их электрическом импульсном пробое.

Электроимпульсный способ разрушения конденсированных сред был предложен в Томском политехническом институте школой профессора А.А.Воробьёва и признан как открытие.

Преимущества ЭИ бурения были реализованы на опытных (пилотных) установках в различных регионах России: Томск, Рудный Алтай, Курская магнитная аномалия, Колыма, Байкало-Амурская магистраль и т.д., а также в Казахстане (Лениногорск). Было пройдено более 1000 метров скважин (максимальная глубина на одной скважине составляла 233 м) и зафиксирована скорость проходки скважины диаметром 250 мм 14 м/ч при частоте следования импульсов 10 имп/с на вечной мерзлоте (Колыма).

Опытная эксплуатация ЭИ установок позволила выявить ряд недостатков, которые затрудняют проектирование и создание промышленных образцов ЭИ буровых установок.

Одной из проблем ЭИ бурения является использование высоких амплитуд импульсного напряжения (до 400 кВ и более), которые необходимо транспортировать на рабочий инструмент (буровой наконечник). Основная масса отказов при бурении связана с электрическим пробоем твёрдой и жидкой изоляции в буровом снаряде. Все исследователи при полевом бурении использовали в качестве рабочей жидкости трансформаторное и соляровое масло. В настоящее время по требованиям экологии эти жидкости использовать запрещено. Твёрдая изоляция, используемая в буровом снаряде, испытывает многократное воздействие импульсного напряжения при высоких градиентах электрического поля, что существенно уменьшает срок её службы и требует специальных исследований. Поиск методов снижения амплитуд импульсного напряжения, используемого для ЭИ бурения, а также поиск и

исследование буровых растворов, отвечающих требованиям ЭИ технологии и экологии, является актуальной задачей.

Следует отметить, что проведенные ранее исследования так и не определили наиболее эффективные области применения ЭИ технологии бурения. Последующие исследования (включая выполненные диссертантом) позволяют на сегодня назвать в качестве таковых: бурение геотермальных скважин, глубоких скважин на нефть и газ, скважин под опоры мостов и захоронение опасных отходов, вентиляционных шахтных скважин). Это обусловило необходимость исследования процессов при бурении скважин и стволов большого диаметра и глубоких скважин, а также разработки соответствующего оборудования.

Ранее проведенные исследования показали, что увеличение рабочего промежутка между электродами перспективно для увеличения производительности процесса. Поэтому исследования характера разрушения горных пород при увеличении длин рабочих промежутков, разработка рабочих накопечников, определение энергетических показателей разрушения позволит перейти к созданию оборудования для бурения скважин большого диаметра. Перспективы глубинного бурения могут быть определены при исследовании изменения электрической прочности буровых растворов и характера разрушения горной породы в условиях повышенных температур и давлений.

Актуальность работы в этом направлении подтверждается заинтересованностью таких фирм, как Komatsu, Schlumberger, Statoil, Metsa, Unodrill, которые финансово поддерживают проводимые исследования.

Идея работы. Идея работы заключается в использовании эффекта выделения энергии в плазменном канале импульсного электрического пробоя в диэлектрических материалах для разрушения горных пород и искусственных материалов.

Цель исследований. Дальнейшая разработка и совершенствование перспективного электроимпульсного метода применительно к бурению глубоких скважин и скважин большого диаметра, а также резания горных пород и искусственных материалов.

Задачи, требующие решения для достижения поставленной цели:

1. Критический анализ результатов разработки и апробирования ЭИ технологии на начальном этапе (примерно 1961-1982гг) с целью определения основных проблем, затормозивших ее внедрение в практику.
2. Выбор и исследования электрической прочности технологичных промывочных жидкостей, отвечающих современным требованиям экологии, в широком диапазоне рабочих промежутков, температур и давлений.
3. Исследования электрической прочности горных пород с высокими прочностными свойствами в широком диапазоне изменения расстояний между электродами, температуры и давления.
4. Поиск и исследование способов снижения пробивных напряжений горных пород при больших межэлектродных расстояниях.
5. Исследование механизмов старения и срока службы полиэтиленовой изоляции при многоимпульсном воздействии; разработка метода отбраковки изоляторов, применимого в ЭИ технологи.

6. Изучение характера разрушения горных пород в широком диапазоне изменения рабочих промежутков при различных величинах энерговклада, температур и давлений.

7. Бурение скважин большого диаметра, резание и отбойка горных пород и разработка рекомендаций для повышения их эффективности.

Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что импульсная электрическая прочность промывочных жидкостей (синтетических экологически чистых жидкостей и буровых растворов) и горных пород при совместном воздействии высоких температур (до 120°C) и давлений (до 35 МПа) позволяет бурить ЭИ методом скважины глубиной, как минимум, до 3500 м и диаметром до 400 мм.

2. Найдены оптимальные параметры импульсного напряжения, позволяющие до 2,4 раза снизить необходимую для пробоя амплитуду напряжения.

3. Показано наличие оптимальных параметров энерговклада в разрядный канал, обеспечивающих максимальную производительность процесса в широком диапазоне изменения рабочих промежутков и параметров источника импульсов.

4. Найдены оптимальные конструкции бурового наконечника и величины энерговклада, обеспечивающие возрастание скорости ЭИ бурения при увеличении диаметра скважины.

5. Выявлены и изучены основные механизмы электрического старения монолитной полимерной изоляции – образование и развитие субмикро- и микро-трещин, искажение поля в результате накопления инжектированных объёмных зарядов и предложен метод отбраковки дефектных изоляторов.

Практическая ценность и реализация результатов:

1. Разработаны методы выбора параметров источника импульсных напряжений и конструкции рабочих органов ЭИ буровых установок для проходки глубоких скважин и скважин большого диаметра.

2. Выбраны синтетические жидкости и буровые растворы, пригодные по экологическим, реологическим и электрофизическим характеристикам для использования при бурения скважин различных глубин и диаметров.

3. Предложены методы уменьшения минимально допустимой амплитуды рабочего импульса напряжения и уменьшения энергии, запасаемой ГИН, радикально снижающие требования к высоковольтной части ЭИ - буровых установок.

4. Предложены феноменологические методы расчёта параметров импульсов и характеристик разрушения горных пород ЭИ способом.

5. Разработана методика отбраковки изоляционных полимерных изделий, применяемых в ЭИ технологии.

6. Разработана, изготовлена и испытана ЭИ - установка для бурения скважин диаметром 400 мм по заказу фирмы Stat Oil и UnoDrill и резания горных пород для Дрезденского университета(Германия).

7. Показана принципиальная возможность ЭИ бурения скважин до глубины 3500 м.

Личный вклад автора. Наиболее важные положения, выносимые на защиту, основаны на результатах, полученных лично автором или группой

сотрудников и аспирантов под руководством и непосредственном участии автора. (Автор руководил лабораторией по изоляционной тематике и исследовательской группой по ЭИ бурению). Опубликованные работы написаны автором диссертации или при его непосредственном участии. По теме диссертации защищено 4 кандидатских диссертации, в выполнении которых автор принимал непосредственное участие в качестве консультанта. Автор принимал участие при проведении ЭИ бурения в полевых условиях в различных регионах страны: Рудный Алтай, Курская магнитная аномалия, Колыма, Байкало-Амурская магистраль, Томская область.

Апробация работы. Идеи и основные результаты диссертационной работы докладывались на Международных, Всесоюзных, Всероссийских и региональных конференциях, совещаниях. Всего сделано 90 докладов.

Из них: международных – 34 доклада, Всесоюзных и Всероссийских – 36 докладов; региональных – 22 доклада.

Результаты работы автора с коллективом сотрудников были представлены и награждены: на 6 Международных и Всероссийских салонах инноваций, технических ярмарках и выставках в период 2002-2011 г.г.

Публикации. По материалам диссертационной работы автором опубликовано 105 научных работ. Из них: 48 работ в изданиях из перечня ВАК и зарубежных; 14 работ в региональных изданиях; 43 научно-технических отчёта. Получено 28 патентов и авторских свидетельств, из которых 4 запатентованы за рубежом.

Объём и структура работы. Диссертационная работа состоит из предисловия, введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 337 наименований. Содержание диссертации изложено на 213 страницах, содержит 87 рисунков и 29 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В предисловии обоснована насущная необходимость разработки новых эффективных способов и методик бурения горных пород. Открытие, сделанное в ТПИ в области электрической прочности твёрдых и жидких диэлектриков в микросекундном диапазоне воздействия импульсного напряжения, позволило предложить новый ЭИ способ разрушения горных пород и, в частности, бурение и резание. Для развития этого способа разрушения и разработки технологий был организован НИИ высоких напряжений при ТПИ. При поддержке заказчиков проводились и проводятся научно-исследовательские работы и полевые испытания ЭИ способа бурения, дробления, резания.

Во введении представлено феноменологическое описание электроимпульсного эффекта и показаны преимущества ЭИ способа бурения горных пород.

Глава 1. Пробой жидкостей и горных пород в условиях электроимпульсной технологии

Формирование канала пробоя и пробой являются основополагающими процессами для электроимпульсной технологии. Характерным для ЭИ технологий является пробой горной породы на фронте или амплитуде косо-

угольной волны импульсного напряжения положительной полярности в резко неоднородном поле. Исследования, проводимые нами, также выполнены преимущественно на положительной полярности. Источник импульсов высокого напряжения – генератор Аркадьева-Маркса (ГИН).

1.1. Вольт секундные характеристики пробоя жидкостей

Жидкость в ЭИ-технологии является одновременно и изоляцией, и рабочей средой, которая обеспечивает внедрение канала пробоя в горную породу и вынос из скважины бурового шлама. В настоящее время в мире разработаны как новые экологически чистые электроизоляционные жидкости (Midel), так и буровые растворы на нефтяной и масляной основе для бурения нефтяных и газовых скважин.

Нами проведены исследования жидкостей, ранее не использующихся в ЭИ технологиях: трансформаторная жидкость Midel 7131, буровые растворы на масляной основе Versa Pro и Versa Clean (разработки фирмы Schlumberger), известково-битумный раствор - ИБР (разработка Московского института нефтехимии им. И.М. Губкина), вода.

Все жидкости имеют достаточно высокую электрическую прочность вплоть до воды, но существенно различаются по удельному электрическому сопротивлению. Вода вызывает большой интерес ввиду её экологичности и дешевизны. Нами проведены исследования вольт-секундных характеристик (BCX) воды на спаде косоугольного импульса в системе электродов, соответствующих ЭИ технологии бурения и резания горных пород, при $S = 10\text{--}90$ мм. Анализ при одинаковых условиях испытаний показывает, что при пробое на фронте и спаде импульса пробивные напряжения практически одинаковы, что обусловлено механизмом возникновения и развития канала разряда в жидкости.

Для ЭИ бурения глубоких скважин необходимо знать характер изменения импульсной электрической прочности рабочих жидкостей и горных пород при совместном воздействии повышенных давлений и температур. Литературные данные по этому вопросу отсутствуют. Впервые, подобные исследования проведены нами.

Нами разработана методика проведения подобных исследований и изготовлена испытательная установка, которая позволяла создавать и поддерживать давление до 40 МПа при температуре до 120 °С, что соответствует условиям в скважине на глубине 3500–4000 м. Электродная система для испытания жидкостей – остриё–плоскость с радиусом кончика острия 0,25 мм и расстоянием между электродами 20 мм. Пробой жидкости осуществлялся на фронте импульса напряжения положительной полярности. Время до пробоя не превышало 0,3 мкс. Жидкости представлены трансформаторным маслом, буровым раствором Versa Pro и водой. Они могут быть классифицированы как неполярная, слабополярная и полярная жидкости соответственно.

При воздействии на жидкости только давления средняя пробивная напряженность масла и воды не изменяется при увеличении давления вплоть до 35 МПа, а для Versa Pro возрастает до давления 2,5 МПа в 1,26 раза и остаётся неизменной при дальнейшем увеличении давления. Буровой раствор – эмульсия более чем из 10 ингредиентов твёрдых и жидких веществ в масля-

ной среде. Дальнейшие исследования проводились в буровом растворе Versa Pro. Применительно к ЭИ бурению этот раствор не изучен.

Величина электрического сопротивления жидкости обуславливает возможность применения её для ЭИ технологии. Известно, что при удельном сопротивлении жидкости менее 1 кОм·см ЭИ бурение невозможно.

Совместное воздействие давления и температуры вызывает быстрое снижение сопротивления R особенно в диапазоне температур 17–50 °С и давлений 0,1–15 МПа (рис. 1.1, кривая 2). Тем не менее при температуре 125 °С и давлении 35 МПа сопротивление бурового раствора остаётся достаточно высоким ($R = 1,85$ МОм) и он может быть рекомендован для ЭИ бурения.

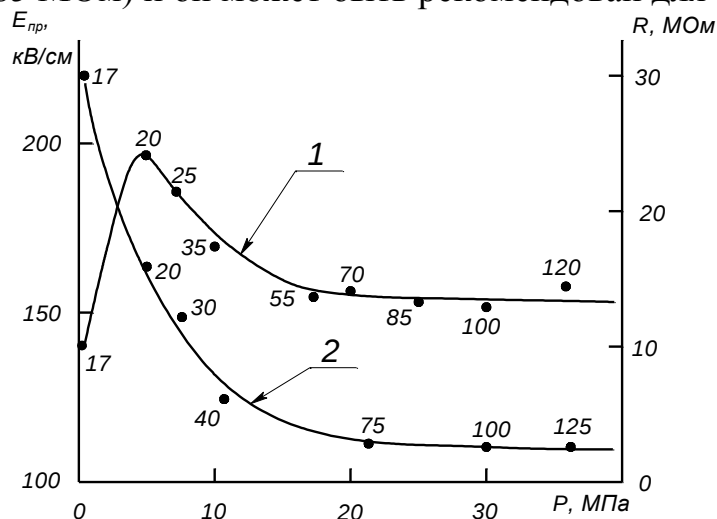


Рис. 1.1. Зависимость средней пробивной напряженности $E_{пр}$ и сопротивления промывочной жидкости от давления и температуры: 1 – $E_{пр}$, 2 – R (цифры у точек – температура)

Исследования по определению электрической прочности бурового раствора проводились при одновременном изменении давления и температуры. Зависимость средней пробивной напряженности $E_{пр}$ от давления и температуры приведена на рис. 1.1, кривая 1. Увеличение давления до 5 МПа и температуры до 20 °С вызывает возрастание $E_{пр}$ в 1,37 раза, что обусловлено, в первую очередь, повышением давления. Дальнейшее совместное повышение давления и температуры приводит к медленному снижению $E_{пр}$ в 1,29 раза по сравнению с максимальным значением, вплоть до $P = 35$ МПа и $T = 125$ °С, что обусловлено повышением температуры. Тем не менее, электрическая прочность раствора удовлетворяет требованиям ЭИ технологии.

1.2. Вольт секундные характеристики пробоя горных пород

Одной из важнейших характеристик ЭИ способа разрушения является электрическая прочность горных пород. В литературе экспериментально определены зависимости электрической прочности для большой гаммы горных пород. Основной объём исследований проведен для электродной системы остриё – плоскость при расстояниях между электродами 30–50 мм.

Нами рассматриваются вопросы электрической прочности горных пород отсутствующие в литературе, посвященной ЭИ эффекту:

1. Зависимость от расстояния между электродами в диапазоне $S = 10\text{--}300$ мм;
2. Совместное воздействие высоких давлений и температур;
3. Пробой на спаде косоугольного импульса напряжения при изменении его параметров.

При этом исследования проведены при многократном воздействии разрушающих импульсов положительной полярности, что наиболее приближено к технологиям ЭИ разрушения.

Для осуществления эффективного пробоя горных пород при ЭИ способе разрушения необходимо определить пробивное напряжение. Эффект снижения пробивного напряжения при воздействии трёх разрушающих импульсов был отмечен в работах В.П. Малахова.

Нами проведены подобные исследования на граните для двух и трёх электродных стержневых систем с расстояниями между электродами 100, 120, 140 мм и воздействии до 55 импульсов при примерно одинаковом энергокладе и одинаковом времени до пробоя на фронте импульса напряжения. Имеет место минимум пробивного напряжения для всех S при воздействии 10 импульсов. При этом глубина разрушения составляет $H=30\text{--}35$ мм.

Привлекательно выбрать в качестве рабочего напряжения минимальное значение $U_{пр}$. Ранее в работах Н.Е. Коваленко, А.Т. Чепикова доказано, что процесс бурения происходит циклически. Цикл определяется числом импульсов $n_{ц}$ и глубиной перемещения бурового снаряда $h_{ц}$. Даны расчётные выражения для $n_{ц}$ и $h_{ц}$. Перемещение бурового снаряда за цикл меньше глубины разрушения, соответствующей минимуму пробивного напряжения. Но при этом максимальное пробивное напряжение составляет 530 кВ, т. е. на 15,9 % ниже, чем при начальных условиях. При бурении гранита реальным буровым снарядом БИ-325 максимальное пробивное напряжение достигало 489 кВ. Отклонение составило 8,3 %, что ввиду высокой гетерогенности горных пород можно считать удовлетворительным. Таким образом, предложена методика определения рабочего напряжения в лабораторных условиях при помощи двух стержневых электродов для конкретных горных пород.

На основании исследований, проведенных нами, получена зависимость пробивного напряжения для гранита в широком диапазоне изменения $S = 10\text{--}300$ мм при многократном воздействии импульсного напряжения. Значения средних и максимальных пробивных напряжений описываются степенной функцией

$$U = U_{10} \cdot S^{0,3}, \quad (1.1)$$

где $U_{10} = 200$ и 224 кВ – среднее и максимальное пробивные напряжения при $S = 10$ мм соответственно; $0,3$ – экспериментальный коэффициент. Новизной нашего подхода к определению пробивного напряжения при лабораторных исследованиях является вовлечение в процесс пробоя многократного воздействия при разрушении горной породы.

Литературные данные по импульсной электрической прочности горных пород при повышенных давлениях и температурах весьма ограничены, а при совместном их воздействии отсутствуют. В этих работах отмечается, что импульсная электрическая прочность горных пород при повышенных давлении-

ях зависит от их пористости, т. е. от степени пропитки окружающей жидкостью их пробивная напряженность может повышаться более, чем в 2 раза.

Исследования, проводимые нами, по импульсной электрической прочности и разрушению горных пород (песчаник, известняк, гранит, полиэтилен) в буровом растворе Versa Pro при совместном воздействии высоких давлений P (до 35 МПа) и температур T (до 120 °С) были поддержаны фирмой Schlumberger. Испытательная установка описана выше. Количество образцов в испытуемой партии 10 штук. Электродная система стержень – стержень расположена на одной поверхности образца. Расстояние между электродами $S = 20$ мм. Перед испытаниями образцы выдерживались в буровом растворе в течение 2 часов. При этом глубина пропитки превышала глубину внедрения канала разряда в горную породу. Зависимость электрической прочности от давления в наших экспериментах аналогична литературным данным (В.В. Кривко), т. е. средняя пробивная напряженность с увеличением давления для пористых горных пород возрастает с повышением P до 5 МПа, а при дальнейшем увеличении P остаётся неизменной. Для беспористого диэлектрика (полиэтилен низкой плотности ПЭНП) электрическая прочность не зависит от давления. Относительное увеличение электрической прочности E_{20}/E_{01} (E_{20} – электрическая прочность при $P = 20$ МПа, E_{01} – при нормальных условиях) возрастает с увеличением пористости горной породы.

При совместном воздействии повышенных давлений и температур электрическая прочность исследованных горных пород изменяется с максимумом (рис. 1.2). При увеличении P до 10 МПа и T до 50 °С электрическая прочность быстро возрастает до максимума, как и для бурового раствора, что в первую очередь, обусловлено повышением давления. Дальнейшее увеличение P и T вызывает спад электрической прочности, которая стремится к электрической прочности пропитывающей жидкости, как наиболее электрически прочной компоненте в комбинации горная порода – жидкость. Это снижение обусловлено увеличением температуры, как фактора в большей мере влияющего на жидкий диэлектрик. Результаты проведенных нами исследований позволяют утверждать, что при повышении давления до 35 МПа и температуры до 120 °С происходит устойчивое внедрение канала разряда в горные породы и их разрушение в жидкости Versa Pro. Следовательно, на глубине 3500 м возможно ЭИ бурение горных пород.

Внедрение ЭИ технологий в промышленность в большой степени сдерживается высокими рабочими напряжениями необходимыми для их осуществления. Насущная задача – снижение рабочих напряжений. Нами впервые проведены исследования для твёрдых диэлектриков и горной породы при осуществлении пробоя на спадающей части косоугольного импульса напряжения.

Всю совокупность физических и химических процессов, протекающих в разрядном промежутке с момента появления на электродах разности потенциалов до его замыкания каналом разряда (пробой) принято делить на две стадии – «зажигание разряда», т. е. формирование начального участка канала

при разности потенциалов U_0 , и пересечение каналом всего промежутка, когда разность потенциалов изменяется от U_0 до пробивного напряжения $U_{пр}$.

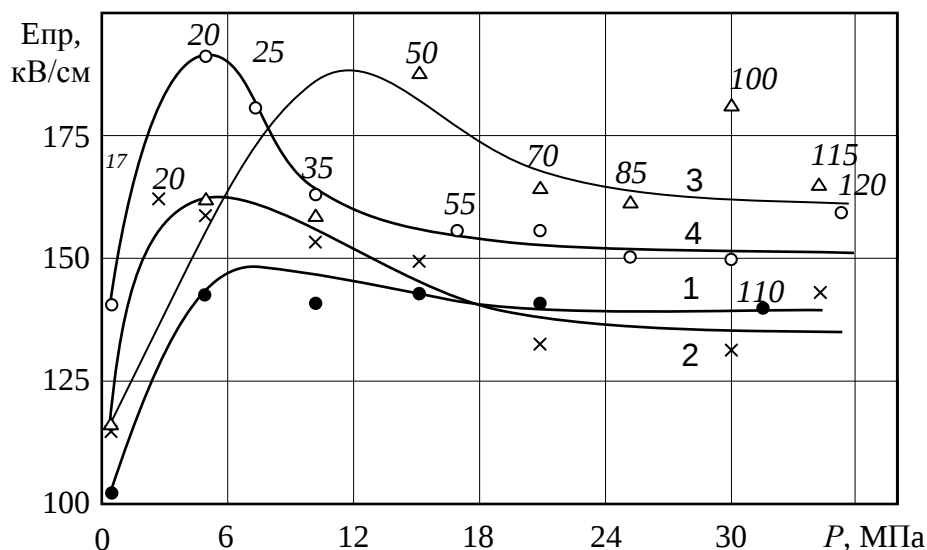


Рис. 1.2. Зависимость пробивной напряженности горных пород от давления и температуры: 1 – песчаник, 2 – известняк, 3 – гранит, 4 – буровой раствор (цифры у точек – температура)

Исследования, проведенные Ю.И.Кузнецовым, доказывают, что U_0 повторяет ход ВСХ твёрдого диэлектрика. При пробое на фронте импульса напряжения отношение $U_{пр} / U_0$ находится в пределах 2,0–3,0 для соответствующей полярности импульса. С увеличением толщины диэлектрика возрастает U_0 . При образовании начального канала при U_0 в твёрдом теле возможны два пути дальнейшего развития канала пробоя. Первый: при пробое на фронте импульса напряжения после образования начального канала напряжение будет возрастать до $U_{ф}$ в течение времени до завершения пробоя на фронте $t_{ф}$. При этом $U_{ф} \gg U_0$. Второй: при пробое на спаде импульса напряжения после образования начального канала при U_0 напряжение до пробоя U_c остаётся квазиинвариантным $U_c \sim U_0$, а время до пробоя значительно возрастает $t_c \gg t_{ф}$.

Реализация этого способа пробоя для ЭИ технологий проведена нами для гранита и бетона при расположении двух стержневых электродов на одной поверхности образцов (как при ЭИ бурении, резании и др.) в трансформаторном масле и воде. Полученные вольт-секундные характеристики гранита и бетона для расстояний между электродами $S = 20–150$ мм, аналогичны имеющимся в литературе, но абсолютные значения пробивных напряжений существенно меньше.

В зависимости от условий эксперимента при пробое на спаде пробивные напряжения U_c снижаются в 1,42–2,38 раза по сравнению с пробоем на фронте $U_{ф}$ и с пробоем на прямоугольном импульсе $U_{п}$, реализованными в литературе. При пробое на спаде вероятность внедрения канала разряда в гранит и бетон составляла 100%. При осуществлении пробоя на спаде значе-

ние пробивного напряжения определяется как длительностью фронта (крутизной), так и длительностью (скоростью спада) импульса.

Нами проведены исследования по определению влияния параметров импульса на пробивное напряжение на спаде для гранита в воде. Длительность фронта изменялась в пределах (0,25–0,75) мкс, а длительность импульса до полуспада – в пределах (1,75–3,15) мкс. Расстояние между электродами $S = 30$ мм. Удельное сопротивление воды $4 \cdot 10^3$ Ом·см.

Для разных длительностей фронта при неизменной длительности импульса 3,15 мкс получены вольт-секундные характеристики, на основании которых можно утверждать, что имеет место оптимальная длительность фронта импульса ($\tau = 0,1$ – $0,25$ мкс), при которой величина U_c для используемых параметров импульса, минимальна. На основании вольт-секундных характеристик при неизменной длительности фронта $\tau = \text{const}$ и изменении длительности импульса получены результаты, из которых следует, что увеличение длительности импульса вызывает уменьшение U_c . Проведенные исследования подтверждают высказанное выше предположение об оптимизации длительности фронта импульса (крутизны) и скорости спада импульса.

Следовательно, требования снижения рабочих напряжений для ЭИ технологий реализуются при пробое на спаде косоугольного импульса напряжения, что позволяет в 1,4–2,4 раза снизить пробивные напряжения. Впервые показано, что при пробое на спаде импульса напряжения имеет место оптимальная длительность фронта импульса, при которой величина пробивного напряжения минимальна, а увеличение длительности импульса приводит к снижению пробивного напряжения.

Глава 2. Пробой твердых диэлектриков и разработка изоляции для устройств электроимпульсной технологии

Изоляция – важнейший элемент всех высоковольтных устройств, в том числе установок ЭИ технологии, который определяет срок их службы и надёжность работы. Электроимпульсные ЭИ технологии выдвинули ряд специфических требований к изоляции при длительном воздействии импульсного напряжения: надёжная работа твёрдой изоляции при заданном числе воздействующих импульсов напряжения и высоких рабочих градиентах; стойкость к окружающей жидкой среде; ударопрочность при пробое жидкой среды и циклических перемещениях рабочего инструмента.

Чрезвычайно скудны сведения о причинах старения полимерных диэлектриков. Особенно для изоляции больших толщин при длительном воздействии высокого импульсного напряжения микросекундной длительности. Кроме этого, уникальный характер ЭИ технологии и устройств потребовали создания изоляционных изделий не выпускаемых промышленностью. По этой причине в НИИ высоких напряжений при ТПИ, начиная с 1963 года, под руководством В.Г. Сотникова, В.Ф. Вазова, С.М. Лебедева ведутся исследования по разработке и совершенствованию технологии производства крупногабаритных полимерных высоковольтных (сотни киловольт) изоляторов и других электроизоляционных изделий и исследования механизмов старения и отказов полимерной монолитной изоляции на импульсном напряжении, а

также методики определения оптимальных режимов отбраковочных испытаний изоляторов.

Результаты этих исследований отражены в 88 работах. Под руководством автора по данным тематикам защищено 3 кандидатских диссертаций.

2.1. Вероятностно-статистические исследования электрического старения полиэтиленовой изоляции

На основании испытаний 15 полимерных материалов в качестве рабочего диэлектрика нами выбран полиэтилен низкой плотности (ПЭНП), а так же разработана технология изготовления образцов и изоляторов в массовом количестве. Образцы и изоляторы имели коаксиальную форму без дополнительной механической обработки. Основные эксперименты проведены на образцах с толщиной изоляции 5,2 мм. На рабочую поверхность образцов наносился полупроводящий слой, который заземлялся. Состав раствора и способ нанесения полупроводящего слоя разработан автором и на него получено авторское свидетельство. Одновременно испытывалось от 1 до 50 образцов. Источником высокого импульсного напряжения являлся ГИН на номинальное напряжение 500 кВ с ёмкостью в разряде 0,00625 мкФ и частотой следования импульсов до 30 имп/с. Колебательная форма импульса напряжения выбрана, исходя из требований ЭИ технологии бурения, где величина напряжения при переходе через нуль (отрицательная полуволна) в среднем составляет 0,3 от основной полуволны. Ускорение испытаний по старению при длительном воздействии импульсного напряжения осуществлялось за счёт усиления напряженности электрического поля в образцах, как метод наиболее широко применяющийся в литературе при подобных исследованиях.

Литературными и нашими исследованиями доказано, что для вероятностного описания отказов изоляции наиболее приемлемым является закон (распределение) Вейбулла, математическое выражение которого для кратковременной электрической прочности имеет вид:

$$P(E) = 1 - \exp[-(E_i / E_e)^a], \quad (2.1)$$

а для описания отказов во времени

$$P(t) = 1 - \exp[-(t_i / t_e)^b], \quad (2.2)$$

где $P(E)$, $P(t)$ – вероятность пробоя при кратковременном воздействии напряжения в функции напряженности электрического поля и в течение времени (число импульсов) t ; E_i , t_i – текущее значение пробивной напряженности и времени (число импульсов) до пробоя; E_e , t_e – пробивная напряженность и время до пробоя при вероятности $P = 0,632$ – параметр распределения Вейбулла; a , b – параметр распределения Вейбулла, характеризующий дисперсию измеряемых величин. Доверительная вероятность проводимых исследований не хуже $\alpha = 0,92$. В данной работе исследуются зависимости относительно параметров распределения Вейбулла E_e , t_e , что позволяет по (2.1), (2.2) определить значение E_i , t_i для заданной вероятности пробоя.

2.2. Многоимпульсная электрическая прочность полиэтиленовой изоляции.

На графике Вейбулла распределение отказов полимерной изоляции имеет, как правило, два прямолинейных участка. Нами на большом статистическом материале доказано, что первый прямолинейный участок обусловлен

технологическими дефектами в объёме изоляции, а второй участок описывает отказы качественных образцов. Точка перегиба на графике Вейбулла достаточно точно определяет относительное количество (вероятность отказа) дефектных образцов и число импульсов необходимое для их выявления. Число импульсов до точек перегиба и вероятность их появления в зависимости от напряженности электрического поля описываются выражениями (2.3), (2.4):

$$t_{\text{тп}} = (t_{\text{тп1}} \cdot E_1^n) \cdot E^{-n}; \quad (2.3)$$

$$P_{\text{тп}} = c + d \cdot E, \quad (2.4)$$

где $t_{\text{тп}}$, $t_{\text{тп1}}$ – число импульсов до точки перегиба при E , E_1 соответственно. Значения коэффициентов в (2.3), (2.4) следующее: $n = 7,16$; $c = 0,221$; $d = 0,0024$. Из (2.3), (2.4) следует, что с увеличением E уменьшается число импульсов до точки перегиба, а количество образцов с технологическими дефектами возрастает, что обусловлено вовлечением дополнительных дефектов ответственных за отказы на первом участке с повышением E .

Следовательно, применение известного вероятностного закона позволяет определить количество импульсов необходимое для отбраковки технологических дефектов вновь изготавливаемых изделий. Ускорение отбраковочных испытаний повышенным напряжением вызывает затруднение с выбором $E_{\text{исп}}$ и $t_{\text{исп}}$, так как неизвестна степень ухудшения (время жизни) качественных (отбракованных) изделий при работе на рабочем напряжении.

2.3. Влияние предварительного воздействия импульсов на электрическую прочность полиэтиленовой изоляции.

Полимерные диэлектрики имеют чётко выраженную зависимость снижение электрической пробивной прочности от времени предварительного воздействия напряжения. Это связано со старением полимерных диэлектриков под действием любых нагрузок и, в частности, электрического поля. В литературе работ, посвященных изменению одноимпульсной электрической прочности при предварительном старении под действием электрического поля, мало. (В англоязычной литературе эта процедура названа «prestress-ing». Этот термин мы используем в транскрипции «престрессинг»). Недостатками этих работ являются как высокие градиенты испытательных напряжений, так и узкая область времён старения.

Нами испытательные напряженности выбраны в диапазоне $0,057 E_0 - 0,453 E_0$, где E_0 – 50 % пробивная напряженность для партии образцов не подвергнутой престрессингу. Максимальное количество испытательных импульсов превышало количество импульсов соответствующее точке перегиба для заданного испытательного напряжения. Количество образцов после престрессинга всегда составляло не менее 20 штук. Анализ результатов подобных рис. 2.1 показывает, что в зависимости от величины $E_{\text{исп}}$ параметр E_e изменяется с максимумом, а параметр a – с минимумом в одной и той же области $E_{\text{исп}}$. Следовательно, одноимпульсная пробивная прочность полиэтиленовой изоляции $E_{\text{пр}}$ в результате престрессинга даже при оптимальном числе испытательных импульсов, когда выявлен весь технологический брак, изменяется с максимумом при конкретной величине испытательной напряженности $E_{\text{исп}} \leq 0,3E_0$.

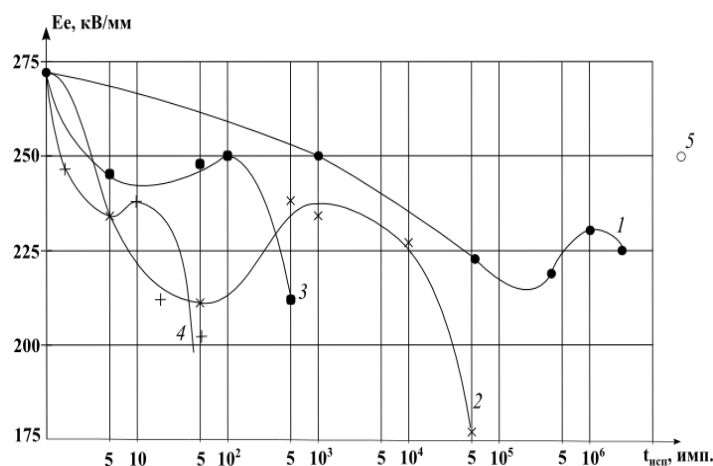


Рис. 2.1. Изменение E_e в зависимости от числа испытательных импульсов:
 1 – $E_{исп} = 25,0$; 2 – $E_{исп} = 50,0$; 3 – $E_{исп} = 80,0$; 4 – $E_{исп} = 111,0$; 5 – $E_{исп} = 13,8$
 кВ/мм

Эти результаты позволяют предположить, что одноимпульсная электрическая прочность полимерной изоляции в процессе старения зависит от сложного сочетания испытательной напряженности и числа воздействующих импульсов напряжения даже после отбраковки технологических дефектов. В настоящее время не удаётся связать изменение пробивных градиентов диэлектриков после определенного времени старения с дальнейшим «временем жизни» их на рабочем напряжении, хотя такие попытки делаются. Необходимо изучение влияния престрессинга на «время жизни» полимерной изоляции на рабочем напряжении.

Исследования проводились на коаксиальных образцах. Рабочая напряженность электрического поля в образцах принята $E_p = 50$ кВ/мм. Испытательные напряженности при престрессинге составляли $E_{исп} = (1,33; 1,66; 2,00) E_p$. Максимальное количество испытательных импульсов выбиралось большим, чем необходимо для отбраковки технологических дефектов, т. е. $t_{исп} > t_{тп}$. Все промежуточные значения чисел импульсов выбраны произвольно с учётом $E_{исп}$. Ограничимся анализом параметров распределения Вейбулла b и t_e .

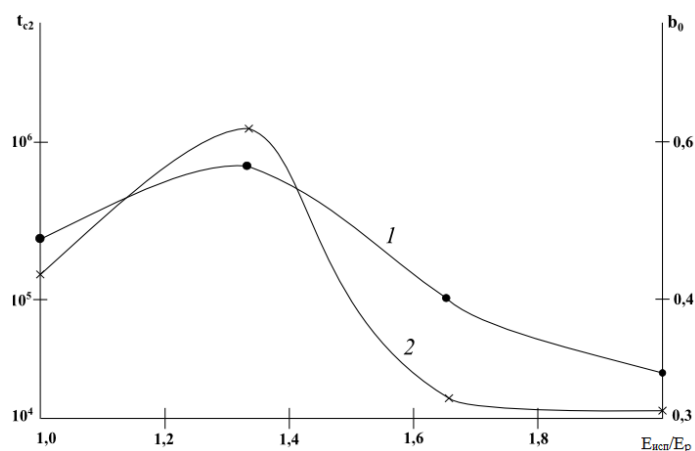


Рис. 2.2. Изменение параметров Вейбулла t_{e2} и b_2 в зависимости от $E_{исп}/E_p$:
 1 – t_{e2} ; 2 – b_2

Получено семейство вероятностно-статистических зависимостей распределения отказов образцов от числа импульсов на рабочем напряжении после престрессинга для всех испытательных напряженностей. На рис. 2.2 приведены закономерности изменения параметров Вейбулла t_{e2} и b_2 для вторых участков, остающихся после престрессинга, в функции $E_{исп} / E_p$.

На основании этих закономерностей можно сделать следующие выводы:

- отбраковка технологических дефектов при $t_{исп} = t_{отбр}$ увеличивает «время жизни» полиэтиленовой изоляции по сравнению с исходной неотбракованной партией образцов до максимума, который соответствует области испытательной напряженности $E_{исп} \leq 1,33 E_p$;
- параметр b_2 изменяется с максимумом в той же области $E_{исп}$, что и параметр t_{e2} ;

2.4. *Исследование кинетики объёмного заряда, трещинообразования и влияния микродефектов на многоимпульсную прочность полимерной изоляции.*

Под действием внешнего электрического поля в объёме диэлектрика происходит перемещение заряженных частиц и, как следствие, образование объёмных зарядов (ОЗ). Наличие ОЗ неизбежно сказывается на степени старения диэлектриков при длительном воздействии напряжения, как за счёт усиления, так и ослабления электрического поля в локальных областях. Механизмы образования и участия ОЗ в электрическом старении многообразны. Большинство традиционных методов измерения ОЗ непригодно для изучения динамики поведения ОЗ при длительном воздействии напряжения. Нами использованы наиболее перспективные неразрушающие методы измерения ОЗ: метод радиационной диагностики – альбедный β – метод и метод волны деформации – метод акустического зонда. Метод акустического зонда в последние годы широко применяется во всем мире.

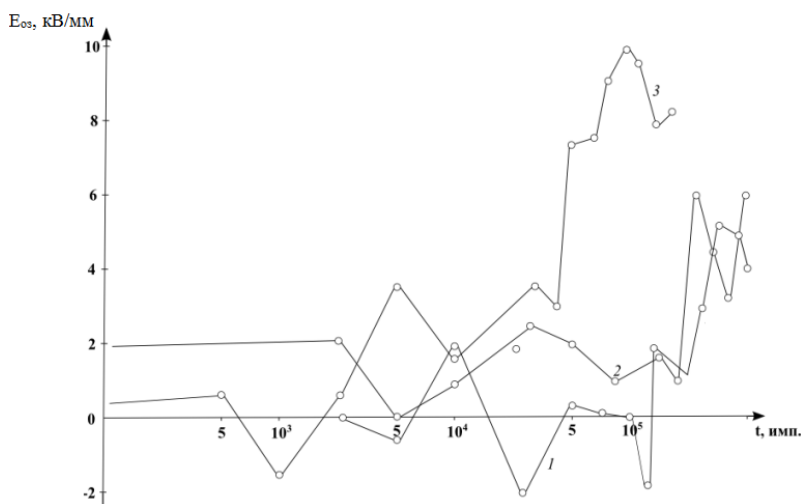


Рис. 2.3. Зависимость напряженности поля объемного заряда от количества импульсов напряжения, воздействующих на образцы из ПЭ:

1 – поле вблизи анода; 2, 3 – вблизи катода; 1, 2 – импульс колебательный; 3 – унipoлярный; поле неоднородное; $E_{исп} = 90$ кВ/мм

Альбедный β – метод позволяет измерять ОЗ в локальных зонах образцов при глубине зондирования в наших экспериментах 0,2 мм, а метод акустического зонда измеряет интегральную величину ОЗ в локальной плоскости зондирования по всему размеру образца. На рис. 2.3 приведены зависимости напряженности электрического поля ОЗ от количества воздействующих импульсов для полиэтилена, измеренного альбедным β – методом. Подобные зависимости получены для многих десятков образцов при сканировании излучения по их рабочей площади.

Установлено, что в процессе длительного воздействия импульсного напряжения в образцах происходит накопление ОЗ, создающего собственное электрическое поле, которое зависит от длительности нагружения, конфигурации внешнего поля, свойств материала, формы импульса напряжения и др. Тем не менее можно выявить следующие тенденции:

- зависимость $E_{\text{оз}} = f(t)$ имеет колебательный характер;
- увеличение числа импульсов, воздействующих на образец, увеличивает напряженность поля ОЗ и достигает 17 кВ/мм, а область малого числа воздействующих импульсов характеризуется нерегулярным и труднопредсказуемым изменением $E_{\text{оз}}$;
- при увеличении $E_{\text{исп}}$ напряженность поля ОЗ увеличивается;
- воздействие аperiodической формы импульса создаёт существенно большую напряженность $E_{\text{оз}}$ (1,6 крат) по сравнению с колебательным импульсом;
- знак $E_{\text{оз}}$ вблизи анода и катода при большом числе воздействующих импульсов одинаков и имеет положительную полярность. Последняя тенденция подтверждается при измерении ОЗ акустическим зондом.

Наличие ОЗ неизбежно влияет на процесс электрического старения полимерных диэлектриков, который протекает с разной скоростью в различных областях образцов.

Нами впервые получена зависимость числа импульсов до отказов от величины разности потенциалов между электродами U , измеренной акустическим зондом, для партии образцов в исходном состоянии. На рис. 2.4 дана зависимость вероятности безотказной работы ψ образцов из ПММА от величины U . Наличие точки перегиба в зависимости $\psi = f(U)$ характеризует качество образцов: при высоких значениях U до точки перегиба отказывают образцы с техническими дефектами, а при относительно малых U выходят из строя качественные образцы. На данный способ отбраковки нами получено авторское свидетельство. Как недостаток данного метода отбраковки, следует отметить сложность его технического исполнения.

Одной из общих причин старения и ранних отказов твёрдой изоляции является неоднородность структуры изоляционных материалов и наличие различного вида дефектов микро- и макроразмеров стохастически распределённых в её объёме. При воздействии электрического поля различные дефекты и неоднородности оказываются сложным образом взаимосвязаны. Выделить определяющую роль отдельной неоднородности в процессе старения и пробоя крайне затруднительно. Цель данных исследований: 1) влияние ис-

ходных неоднородностей и микро- и макродефектов на число импульсов до пробоя; 2) трещинообразование в объёме полимерной изоляции при длительном воздействии импульсного напряжения.

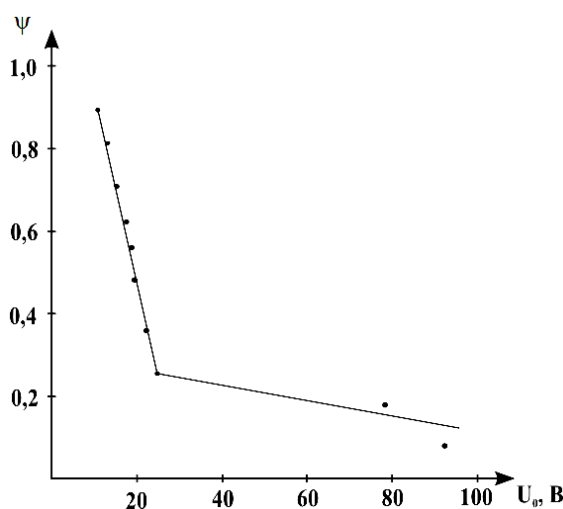


Рис. 2.4. Зависимость вероятности безотказной работы образцов ПММА от разности потенциалов между электродами в исходном состоянии

Исследования проводились на образцах ПММА и ПЭНП в системе электродов стержень-стержень и полусфера-плоскость с толщиной рабочего участка от 0,8 до 2,5 мм. Рабочая поверхность образцов под электродами покрывалась напылением платины. Измерения по пп. 1 и 2 проводились периодически по заданной программе.

Контроль размеров, формы, количества, места расположения в рабочем объёме исходных дефектов производился послойно на микроскопе с увеличением $\times 100$. Фиксировались все неоднородности размером 10 мкм и более. Было исследовано 120 образцов.

Из полученных результатов следует, что число импульсов до пробоя не коррелирует с количеством и размерами исходных неоднородностей. Отсутствует связь и с распределением их по рабочему объёму. Форма, размер, цвет неоднородностей остаются неизменными до пробоя, несмотря на то, что с большой долей вероятности частичные разряды имели место. Следовательно, в наших экспериментах ещё не завершилась инкубационная стадия развития дендрита. При этом канал пробоя в подавляющем большинстве случаев не проходит через исходные неоднородности. Наиболее важным результатом данных исследований можно считать, что далеко не все исходные макро-неоднородности в полимерах могут рассматриваться в качестве дефектов, ответственных за развитие канала пробоя.

Для исследования возможности трещинообразования в полимерных диэлектриках использован метод светорассеяния. Нами впервые обнаружено, что при длительном воздействии импульсного напряжения на образцы ПММА и ПЭНП в их объёме возникают субмикро- и микротрещины, концентрация и размер которых возрастает с увеличением числа воздействующих на образец импульсов. Разрушения этого вида зарождаются независимо

от наличия исходных неоднородностей во всём объёме образца, как правило в «бездефектных» зонах, что свидетельствует о высокой чувствительности начальных процессов разрушения к неоднородностям структуры полимеров на молекулярном и надмолекулярном уровнях. Это предположение следует из термофлуктуационной теории разрушения полимеров С.Н. Журкова. Нами проведён расчёт времени необходимого для зарождения трещин при воздействии электрического поля для ПММА и ПЭНП. Экспериментальная и расчётная зависимости времени зарождения трещины от испытательной напряженности удовлетворительно совпадают. Образование трещин в локальных зонах способствует интенсивному образованию ОЗ, что вызывает перераспределение напряженности электрического поля в объёме образца и изменение скорости его старения. На ранних стадиях размер трещин составляет сотни ангстрем, а на заключительной стадии они достигают тысяч ангстрем.

Нами впервые установлено зарождение и развитие субмикро- и микро-трещин в объёме полимерных диэлектриков при длительном воздействии импульсного напряжения и высказана гипотеза относительно природы этого процесса.

2.5. Методика отбраковки электроизоляционных изделий.

При изготовлении изоляции для электроимпульсных буровых снарядов (ЭИБС) использовался ПЭНП. Форма изолятора конусная с отверстиями для прохода промывочно-изоляционной жидкости на периферии изолятора. В частности, нами получено авторское свидетельство на форму и конструкцию центрирующего изолятора. В табл. 2.1 приведены конструктивные и электрические характеристики ЭИ буровых снарядов. Толщина изоляции ЭИБС составляла $\Delta = 27,5\text{--}101$ мм. Получение качественной монолитной изоляции такой толщины из полиэтилена представляет значительные трудности. Нами была разработана технология изготовления изоляторов под вакуумом. Подробное описание технологии представлено в опубликованных нами работах.

В табл. 2.1: D/d – отношение диаметров коаксиальной системы бурового снаряда; Δ – толщина изоляции изоляторов в снаряде; $U_{\text{пер}}$ – напряжение перекрытия изолятора по поверхности в буровом снаряде; $U_{\text{пр г.п.}}$ – максимальное напряжение пробоя горной породы; $E_{\text{м}}$ – максимальная напряженность электрического поля в изоляторе; $E_{\text{ср}}$ – средняя напряженность электрического поля в изоляторе.

По этой, принятой нами, технологии изготовлена партия изоляторов для бурового снаряда БИ-108 ($S=30$ мм) (табл. 2.1) в количестве 112 шт. Все изоляторы предварительно отбракованы. Первый отказ при отбраковке произошёл после воздействия 60 имп. В процессе бурения снарядом БИ-108–30 и дальнейших испытаниях на изоляторы было подано 15 200 000 имп. Первый отказ на рабочем напряжении после отбраковки произошёл при воздействии 170 000 имп. Этим буровым снарядом было пробурено 60 м скважин без отказов изоляции.

Для снаряда БИ-127 была изготовлена и отбракована партия изоляторов. Бурение проводилось по крупноскелетным вечномёрзлым отложениям в районе Колымы при температуре окружающего воздуха до минус 53 °С. Пробу-

рено 52 м скважин. Вышли из строя 3 изолятора в буровом наконечнике вследствие хрупкого раскола при ударах бурового снаряда о забой скважины, так как температура была близка к температуре стеклования для ПЭНП. Изоляторы в снаряде выдержали 260 000 импульсов без отказов.

Таблица 2.1

Конструктивные и электрические характеристики ЭИ буровых снарядов

Тип ЭИБС	D / d	Δ , мм	S , мм	$U_{\text{пер}}$, кВ	$U_{\text{пр.г.п.}}$, кВ	E_m , кВ/мм	$E_{\text{ср}}$, кВ/мм
БИ-89	3,20	27,5	15	385	220	15,1	8,0
БИ-108	2,78	32,0	15	445	220	12,0	6,9
БИ-108	2,78	32,0	20	445	240	13,0	7,5
БИ-108	2,38	29,0	20	406	240	13,2	8,3
БИ-108	2,78	32,0	30	445	280	15,2	8,7
БИ-127	3,33	42,0	50	537	360	16,6	8,6
БИ-219	2,72	64,0	70	704	420	10,7	6,6
БИ-325	2,87	101,0	120	798	489	8,6	5,0

Можно констатировать, что изоляторы, изготовленные по разработанной нами технологии и метод их отбраковки показали удовлетворительную работу при полевых и лабораторных испытаниях на данном этапе развития ЭИ способа бурения.

На основании результатов, проведенных нами исследований по старению полимерной изоляции в больших толщинах, предложен эмпирический метод расчёта числа импульсов до пробоя при заданной вероятности отказа для изоляторов ЭИ буровых снарядов, что позволяет ориентировочно оценивать работоспособность изоляции и, следовательно, бурового снаряда.

Глава 3. Влияние параметров разрядного канала и условий в рабочей зоне на эффективность электроимпульсной технологии

Разрушающее действие канала пробоя применяется в технологиях бурения скважин, резания, удаления поверхностного слоя. Количественные характеристики разрушения определяются процессом передачи энергии в плазму канала, образованного в предпробивной стадии. Специальные сопоставительные исследования эффекта разрушения в различных условиях пробоя при фиксированных режимах энергозатрат на единицу длины канала разряда впервые проведены нами.

3.1. Электроимпульсное разрушение горных пород и бетона (неподвижная система электродов)

Нами проведены исследования закономерностей изменения основных характеристик ЭИ разрушения гранита в трансформаторном масле и в воде в широком диапазоне изменения расстояний между электродами (10–300 мм) и энергозатрат (10–110 Дж/мм).

Одной из важных характеристик ЭИ-разрушения является глубина внедрения канала разряда H , которая имеет стохастическую природу, а известные литературные данные зависят от различных методик проведения экспери-

ментов. Известно, что с увеличением S абсолютная глубина внедрения канала разряда возрастает, а относительная уменьшается.

На основании, полученных нами результатов, среднее значение относительной глубины разрушения $h=H/S$ в зависимости от S может быть представлено выражением

$$h = h_{10} / S^{0,25}, \quad (3.1)$$

где $h_{10} = 0,36$ – среднее значение относительной глубины разрушения для $S = 10$ мм при воздействии трёх импульсов. При этом имеет место существенная дисперсия значений относительных глубин разрушения, достигающая двух крат. При многоимпульсном воздействии ($n \leq 15$ имп.) глубина разрушения увеличивается с насыщением. Например, для $S = 10$ мм значение $h_{10} = 0,6$, т. е. увеличение составило 1,69 раза. Глубина разрушения возрастает с увеличением энерговклада и тем больше, чем меньше расстояние между электродами. Это причины различия h у разных авторов. Следовательно, для увеличения производительности разрушения горной породы следует увеличивать расстояние между электродами и энерговклад.

Максимальная производительность с увеличением S от 50 мм до 300 мм возрастает в 32,7 раза. Подобную тенденцию при меньших S подтверждают результаты других исследователей. Следовательно, оптимизация условий разрушения может производиться как по производительности, так и по энергозатратам.

Необходимо исследовать зависимости производительности разрушения и энергозатрат от S при неизменном энерговкладе. Подобные исследования в литературе отсутствуют. Нами получена эмпирическая зависимость $Q = f(S)$ в виде

$$Q = 0,16 \cdot S^{a_i}, \quad (3.2)$$

где a_i – показатель степени, зависящий от энерговклада, например, для $M = 50$ Дж/мм $a_i = 2,15$, а для $M = 20$ Дж/мм $a_i = 2,0$; 0,16 – производительность разрушения при $S = 1,0$ см. Для $S = 1,0$ см заданные величины энерговклада являются избыточными. Для тех же значений M получена расчётная зависимость удельных энергозатрат от S

$$W_{уд} = W_0 / S, \quad (3.3)$$

где W_0 – удельные энергозатраты при $S = 1,0$ см, которые зависят от M , например, для $M = 50$ Дж/мм $W_0 = 3000$ Дж/см³, а для $M = 20$ Дж/мм $W_0 = 1250$ Дж/см³; S – в сантиметрах. На основании этих данных можно утверждать, что для каждого значения S имеет место величина M , при которой происходит наиболее эффективное разрушение.

3.2. Влияние размеров и формы электродов при электроимпульсном разрушении

Конструктивные особенности буровых наконечников во многом определяют производительность и энергоёмность процесса бурения горных пород. В первый период разработки ЭИ-технологии не сформировалось единое мнение относительно наиболее рациональной формы электродов для ЭИ буровых наконечников. Были предложены две существенно различные формы – стержневая и пластинчатая. Бурение скважин большого диаметра требует

применения комбинации стержневых и пластинчатых электродов разнообразной формы и размеров (рис. 3.1).

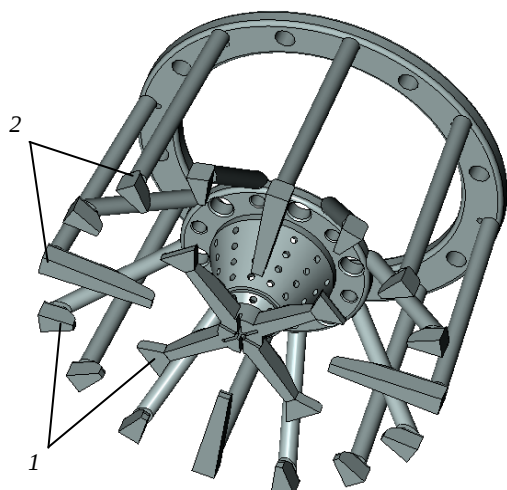


Рис. 3.1. Эскиз электроимпульсного бурового наконечника:

- 1 – высоковольтные электроды;
2 – заземленные электроды

Нами проведены эксперименты по влиянию формы электродов на характеристики разрушения при $S = 100$ мм для электродных систем стержень–стержень, стержень–пластина, пластина–пластина. При многократном воздействии импульсов пробивное напряжение и энерговклад для всех электродных систем практически одинаковы. Производительность разрушения изменяется с максимумом при увеличении числа импульсов и соответствует 6–10 импульсам. Переход от стержневых электродов к пластинчатым значительно увеличивает производительность разрушения при её максимальном значении (1,7 раза для стержень–пластина, в 2,28 раза для пластина–пластина). При незначительном отличии глубин разрушения для различных электродных систем увеличение производительности при переходе к пластинчатым электродам, в первую очередь, определяется увеличением площади разрушения (ширины откольной воронки). При этом значительно уменьшаются энергозатраты в 2,1 раза при переходе к электродам пластина–пластина. При разработке электрода его форма и размер, обеспечивающие эффективную работу, должны быть выбраны из сопоставления вольт-секундных характеристик горной породы и рабочей жидкости: чем больше разница их пробивных напряжений при определенном времени до пробоя, тем может быть больше размер электрода.

3.3. Влияние повышенных давлений и температур при электроимпульсном разрушении

Нами впервые проведены исследования пробоя и разрушения гранита ($\sigma = 16$ МПа), известняка ($\sigma = 12$ МПа), песчаника ($\sigma = 8,6$ МПа) при совместном воздействии повышенных давлений до 35 МПа и температур до 120 °С в буровом растворе Versa Pro. Расстояние между электродами изменялось в диапазоне 10–30 мм. Основные результаты получены при $S = 20$ мм. Энергия, запасаемая ГИН, составляла 500 Дж. Пробой осуществлялся на фронте импульса напряжения положительной полярности. Измерение параметров откольной воронки производилось после воздействия на образец пяти им-

пульсов Глубина разрушения при совместном воздействии давления и температуры не зависит от P и T и для исследованных горных пород значения глубин близки и составляют (0,27–0,32) S , т. е. такие же как при нормальных атмосферных условиях. Но производительность разрушения быстро уменьшается, а энергозатраты возрастают в диапазоне относительно низких давлений и температур 2,5–5,0 МПа и температуре 17–20 °С. Определяющую роль в этом случае играет увеличение давления. При этом существенное значение имеют физико-механические характеристики горных пород, в частности механическая прочность при одноосном сжатии σ . В табл. 3.1 даны значения относительного изменения производительности и энергозатрат с увеличением давления и температуры, где $Q_{0,1}$, $W_{0,1}$ производительность и энергозатраты при нормальных условиях, Q_{35} , W_{35} – производительность и энергозатраты при $P = 35$ МПа и $T = 110^\circ \text{C}$.

Относительное снижение производительности и повышение энергозатрат при совместном воздействии давления и температуры для гранита существенно больше, чем для известняка и песчаника, что может быть связано с механической прочностью и хрупкостью исследованных горных пород. Следует отметить, что абсолютные значения производительности для указанных горных пород при $P > 10$ МПа и $T > 30^\circ \text{C}$ очень близки. Зависимость производительности разрушения гранита от расстояния между электродами при совместном воздействии повышенных давлений до $P = 25$ МПа и температур до $T = 85^\circ \text{C}$ может быть представлено в виде

$$Q = Q_0 \cdot S^{2,5}, \quad (3.4)$$

где $Q_0 = 0,02 \text{ см}^3/\text{имп}$ – производительность при $S = 1 \text{ см}$, т. е. с увеличением S производительность быстро возрастает.

Таблица 3.1

Относительное изменение производительности и энергозатрат при повышенных давлении и температуре

Материал	$Q_{0,1} / Q_{35}$	$W_{0,1} / W_{35}$
Гранит	10,9	0,088
Известняк	5,3	0,218
Песчаник	4,1	0,185

Поскольку глубокое бурение осуществляется скважинами большого диаметра, то при ЭИ бурении возможно увеличение $S > 30 \text{ мм}$. По нашему мнению, ЭИ способ бурения глубоких скважин имеет значительные преимущества перед традиционными способами бурения, что подтвердил заказчик (фирма Schlumberger).

Глава 4. Отбойка и резание горных пород и бетона электроимпульсным способом

4.1. Отбойка гранита и бетона

Нами проведены эксперименты по ЭИ отбойке гранита и бетона в воде при расположении электродов как на одной поверхности образцов, так и в шпурах при $S = 100\text{--}300 \text{ мм}$ и разном энерговкладе. Данные эксперименты представляют интерес при разрушении поверхностных слоев дорог, аэродро-

мов, стеновых панелей, неровностей после взрывных работ в тоннелях, шахтах и др. При расположении электродов на одной поверхности производительность разрушения возрастает как с увеличением S , так и с увеличением энерговклада, что подтверждает результаты, приведенные выше. ЭИ способ отбойки менее энергозатратен по сравнению с традиционными способами, что следует из сравнения полученных нами результатов с литературными данными по разрушению крепких горных пород.

Отбойка с использованием шпуров в несколько раз повышает эффективность разрушения. В табл. 4.1 даны примеры разрушения гранита и бетона при $S = 200$ мм и глубине шпуров $H = 100$ мм. Увеличение глубины шпуров ухудшает эффективность разрушения или отсутствует образование откольной воронки.

Из табл. 4.1, следует, что при использовании шпуров энергозатраты при отбойке гранита уменьшаются в $\sim 2,7$ раза и увеличивается производительность разрушения ($\sim 3,2$ раза). При отбойке бетона в сравнении с гранитом энергозатраты уменьшаются в 2,9 раза, а производительность повышается в 2 раза при меньшем энерговкладе. Следовательно, физико-механические характеристики твёрдых тел неизбежно оказывают существенное влияние на эффективность ЭИ разрушения.

Таблица 4.1

Результаты отбойки гранита и бетона

Материал	H, мм	S, мм	$W_{уд}$, Дж/см ³	Q, см ³ /имп	M, Дж/мм	Вид отбойки
Гранит	—	200	140	256	120	Без шпуров
Гранит	100	200	54,8	821	197	Шпуры
Бетон	100	200	17,9	1666	150	Шпуры

4.2. Резание горных пород и бетона (перемещающаяся система электродов)

Резание горных пород, искусственных материалов в широком понимании этого процесса задача актуальная. В проводимых ранее в НИИ высоких напряжений и в Кольском научном центре (г. Апатиты) исследованиях по ЭИ резанию использовались резак, длина которых равна длине прорезаемой щели ~ 35 см, а ширина щели $\sim 5,0$ см. Вследствие большой площади электродной системы резание осуществлялось, как правило, в электроизоляционных (углеводородных) жидкостях. Использовались две основных конструкции резак: пластинчатые, стержневые и их модификации. Общие недостатки подобных резак: «зависание» на стенках щели, трудность удаления разрушенной породы из щели, большая ширина щели, большая энергия, запасаемая ГИН (1000 Дж и более). Наиболее острой и нерешенной проблемой для данных конструкций резак является малый срок службы и надёжности работы твёрдой изоляции.

Нами предложено и впервые проведены систематические исследования при использовании непрерывно перемещаемой вдоль траектории реза двух-

электродной системы, что исключает «зависание» электродной системы на стенках щели, решается проблема надёжности работы изоляции, снижается в разы энергия, запасаемая ГИН. На этот способ и устройство получен патент. Все исследования проведены в технической воде с удельным сопротивлением $(6,5\text{--}30) \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. В качестве разрушаемых материалов использовались гранит ($\sigma = 160 \text{ МПа}$), габбро ($\sigma = 250 \text{ МПа}$), песчаник ($\sigma = 85 \text{ МПа}$), бетон ($\sigma = 75\text{--}80 \text{ МПа}$). Энергия, запасаемая ГИН, изменялась в диапазоне 28–125 Дж, что в 10–16 раз меньше, рекомендованной в литературе. Шаг перемещения электродной системы за время между двумя импульсами t был всегда меньше расстояния между электродами S .

При резании стремятся к уменьшению ширины щели, поскольку уменьшаются расход обрабатываемого материала и энергозатраты. Увеличение энергии в разряде при $t = \text{const}$ неизбежно вызывает увеличение ширины щели, а увеличение шага перемещения при $W = \text{const}$ – уменьшение ширины щели, т. е. имеется возможность регулирования ширины щели режимом резания, а также большое влияние на ширину щели оказывают размеры электродов и расстояния между ними.

Эффективность резания зависит от затрат энергии на единицу вновь образованной поверхности Π . При этом необходимо знать количество энергии, выделенной при непрерывном перемещении электродной системы, на длине, соответствующей расстоянию между электродами:

$$W_{\Sigma} = W \cdot n, \quad (4.1)$$

где n – количество импульсов на длине S .

Производительность резания гранита в зависимости от W_{Σ} изменяется с максимумом при прохождении электродной системой расстояния $S = 23 \text{ мм}$ (рис. 4.1). Максимальная величина Π соответствует $W_{\Sigma} = 900 \text{ Дж}$ для любой энергии, запасаемой ГИН, что коррелирует с энергией $W \geq 800 \text{ Дж}$ для неподвижного резака при $S = 20 \text{ мм}$. Но при увеличении W возрастает производительность на импульс. Энергозатраты $\omega = f(W_{\Sigma})$ изменяются с минимумом при том же значении $W_{\Sigma} = 900 \text{ Дж}$. В зависимости от возрастания механической прочности на сжатие (акустической жёсткости, крепости по М.М. Протодьяконову) энергозатраты линейно увеличиваются, как и при неподвижной системе электродов.

Сравнением результатов с уже известными для многоэлектродных резаков показано, что энергозатраты для двухстержневого резака в 2,3–8,0 раз меньше. При этом снижение энергии в разряде составило 18–30 раз, что позволило принципиально изменить массо-габаритные характеристики ГИН, повысить надёжность его работы и решить проблемы с изоляцией электродной системой.

Лучшие показатели для перемещаемой двухэлектродной системы обусловлены уменьшением ширины щели в 2,5–2,7 раза, отсутствием «зависания» электродной системы, уменьшением потерь энергии в предпробивной стадии, особенно в воде.

Предложен эмпирический метод расчёта шага перемещения электродной системы и энергии, запасённой ГИН, для оптимальных условий резания для различных горных пород.

На основании полученных результатов, нами впервые предложено и апробировано бурение горных пород (гранит, песчаник) в воде малоэлектродным

(2–3 электрода) буровым наконечником сплошным и кольцевым (с керном) забоем при непрерывном вращении бурового снаряда с заданной скоростью. Скорость бурения соответствовала результатам, полученным ранее для многоэлектродного бурового наконечника.

При поддержке Германского фонда «Окружающая среда» (дело № 16933 от 16.10.2000) нами разработана, изготовлена, поставлена заказчику и запущена в работу установка для резания горных пород в Дрезденском техническом университете. В настоящее время на ней проводятся исследования.

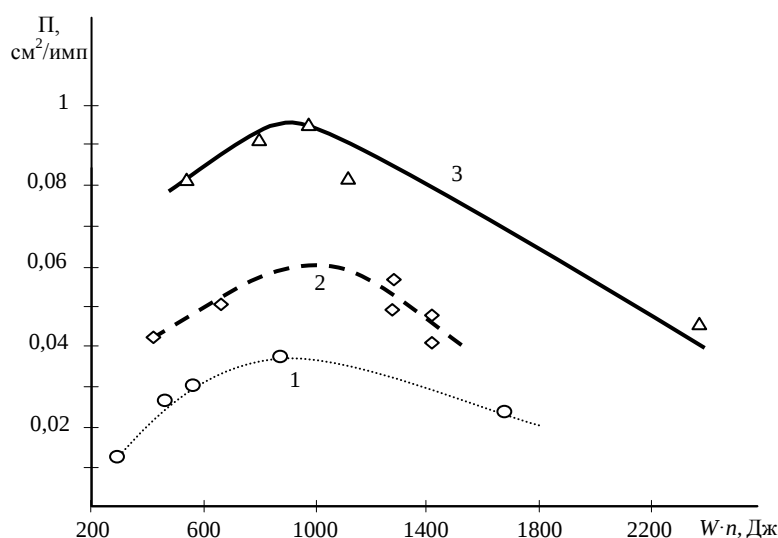


Рис. 4.1. Зависимость производительности резания от энергии затраченной при перемещении электродов на величину межэлектродного промежутка:

1 – $W = 54$ Дж; 2 – $W = 72$ Дж; 3 – $W = 125$ Дж;

Глава 5. Перспективы электроимпульсного бурения скважин большого диаметра

В табл. 5.1, в которой обобщены основные результаты исследований и разработок на первом этапе развития ЭИ-технологии, дана классификация буровых снарядов (БИ), буровых наконечников к ним (БН), достигнутые скорости бурения (V_{10}) для разных горных пород при частоте следования импульсов 10 имп/с и используемые рабочие жидкости.

В табл. 5.1: БИ-44 – буровой снаряд, цифры – диаметр снаряда в мм; БН-50-8 – буровой наконечник, первая группа цифр – диаметр наконечника, вторая – расстояние между электродами, мм.

Из табл. 5.1 видно, что основные результаты по ЭИ бурению получены буровыми наконечниками с расстояниями между электродами 15–40 мм, что серьёзно ограничивало возможности перехода к бурению скважин большого диаметра с большими межэлектродными промежутками. Исследований режимов бурения снарядом БИ-426 с межэлектродным промежутком 120 мм не

проводилось, поскольку он был предназначен для бурения на БАМе, где и был апробирован, но заказчиком не был принят в эксплуатацию.

Таблица 5.1

Обобщение основных результатов исследований и разработок на первом этапе развития ЭИ-технологии

№ п/п	Тип бурового снаряда	Тип бурового наконечника	Характеристики горной породы			Рабочая жидкость	Условия бурения	Скорость бурения v_{10} , м/ч	Скорость механического бурения (алмаз, ротор), м/ч
			Порода	Коэффициент крепости	Категория буримости				
1	БИ-44	БН-50-8 БН-50-14	Мрамор, песчаник	4–6	V–VI	Кабель + масло	Лаб.	6–9	–
2	БИ-57	БН-88-20	Микрокварцит	16–18	X–XI	Кабель + масло	Лаб.	3,8–4,6	–
3	БИ-73	БН-88-20	Микрокварцит	16–18	X–XI	Кабель + масло	Полевые	7,5	1,46
4	БИ-73М	БН-120-20	Микрокварцит	16–18	X–XI	масло	Полевые	3,1	1,36–2,0
5	БИ-89	БН-110-15 БН-110-20	Микрокварцит	16–18	X–XI	Дизельное топливо	Полевые	2,2 2,9	–
6	БИ-108	БН-140-20 БН-140-25 БН-140-30	Окварцованный песчаник	9–10	VIII–X	Дизельное топливо	Полевые	1,3 2,1 5,6	–
7	БИ-108	БН-150-25 БН-150-40	Микрокварцит	16–18	X–XI	Дизельное топливо	Полевые	3,0 4,2–6,7	–
8	БИ-127	БН-200-30 БН-200-50 БН-200-75	Вечная мерзлота	7–8	VII–IX	Дизельное топливо	Полевые	6,1 12,2 17,4	1,15–3,5
9	БИ-426	БН-600-120	Окварцованный песчаник	9–10	VIII–X	Дизельное топливо	Полевые	3,6	–

Анализ состояния буровых работ в мире показывает, что эта технология особенно перспективна для бурения скважин большого диаметра, например,

геотермальных скважин диаметром 500 мм с целью их удешевления. Исследования с такой ориентацией начаты нами в 1994 г. и проведены для межэлектродных расстояний 45–120 мм при диаметрах буровых наконечников 120–360 мм.

5.1. Электроимпульсная буровая установка и методика бурения

В процессе развития ЭИ способа бурения были разработаны установки передвижного и стационарного типов.

Для ЭИ бурения применялись ГИН с различными параметрами: рабочее импульсное напряжения $U_p = 200\text{--}700$ кВ, запасаемая энергия $W = 150\text{--}5500$ Дж, энерговыход $M = 4\text{--}61$ Дж/мм, период колебаний тока $T = 5,5\text{--}20$ мкс, время до пробоя горной работы $t_{пр} = 0,25\text{--}0,5$ мкс, частота следования импульсов $f = 1\text{--}15$ имп/с. Глубина бурения скважин в полевых условиях достигала 47,5 м, а глубина непрерывной проходки – 0,4–30 м. Диаметр скважин составлял $D_{скв} = 100\text{--}400$ мм. Температура окружающей среды изменялась в диапазоне плюс 35 – минус 50 °С.

Универсального критерия бурения нет. Для оценки ЭИ бурения нами выбраны следующие критерии: пробивное напряжение $U_{пр}$; скорость бурения V_{10} ; производительность бурения $Q = V / n$, где V – объём пробуренной скважины, n – число воздействующих импульсов; удельные энергозатраты $W_{уд} = W_{\Sigma} / V$, где $W_{\Sigma} = W \cdot n$; энерговыход $M = W / S$.

5.2. Определение рабочего напряжения при ЭИ бурении.

Правильное определение амплитуды импульсного рабочего напряжения – одно из важнейших условий эффективного ЭИ бурения. В работах Н.Е. Коваленко доказана необходимость применения максимального значения $U_{пр}$ для бурения при заданном расстоянии между электродами, поскольку при этом достигается наибольшая вероятность и глубина разрушения. Нами проведён анализ результатов ЭИ бурения различных горных пород в работах разных авторов. Обращает на себя внимание большая дисперсия $U_{пр}$ даже для конкретной горной породы. Значения $U_{пр}$ практически не зависят от вида горной породы, что обусловлено большим влиянием на электрическую прочность межэлектродного промежутка реальных условий бурения при многоимпульсном воздействии на горную породу. Это, в частности, относится как к интенсивному трещинообразованию на забое и стенках скважины, так и к неизбежному пробое комбинированной среды (горная порода – жидкость). Пробивное напряжение увеличивается медленнее, чем возрастает расстояние, что соответствует известным закономерностям при пробое конденсированных сред. Так для максимального значения $U_{пр}$ при увеличении S в 7 раз происходит возрастание $U_{пр}$ в 2,16 раза, что перспективно при бурении с большими расстояниями между электродами. Для расчёта максимальных амплитуд пробивных напряжений нами получена эмпирическая расчётная зависимость вида

$$U_{пр} = U_0 \cdot S^{0,4}, \quad (5.1)$$

где $U_0 = 180$ кВ – максимальное пробивное напряжения для $S = 1$ см; 0,4 – экспериментальный коэффициент, который не противоречит литературным данным, где он изменяется в диапазоне 0,33–0,6.

Следовательно, расчёт рабочих напряжений для ЭИ бурения возможен как по (5.1), так и по (1.1). При этом появляется возможность в случае необходимости для конкретных условий бурения определить $U_{пр}$ в лабораторных условиях на двухэлектродной системе при соблюдении необходимых методических рекомендаций, как в главе 1.

5.3. Производительность и энергозатраты при ЭИ бурении.

Аналитическая оценка энергозатрат и производительности разрушения, когда потенциальный объём разрушения определяется условиями пробоя, затруднена. Трудоёмкость оптимизационных исследований экспериментальным путём вынуждает ограничиваться одним фиксированным межэлектродным промежутком. В литературе оптимизация проводилась по минимуму энергозатрат, но отсутствуют зависимости оптимума от расстояния между электродами. Эти зависимости получены для двухэлектродных систем по разным методикам.

Нами для энергии, запасённой ГИН, соответствующей минимуму энергозатрат при разных расстояниях между электродами, на основании литературных данных получена зависимость в виде

$$W = 90 \cdot S^{1,6}, \quad (5.2)$$

где $S \leq 7$ см – расстояние между электродами в см.

При этом с увеличением S в 6 раз энергия, запасённая ГИН, приводит к возрастанию энерговклада в канал разряда в ~ 3 раза, а увеличение энерговклада вызывает увеличение производительности разрушения (гл. 3), что способствует увеличению скорости бурения. Скорость бурения – один из важнейших показателей эффективности способа, наряду с энергозатратами. Поэтому необходимо для ЭИ бурения проведение исследований по влиянию энерговклада на процесс бурения. В литературе подобные исследования отсутствуют. Нами впервые проведены исследования по влиянию энерговклада на процесс ЭИ бурения.

Характер изменения зависимости производительности и энергозатрат при бурении в функции S аналогичен подобной для 2-х электродной системы (гл. 3) и может быть представлена в виде

$$Q = Q_0 \cdot (S_i/S_0)^{1,55}; \quad (5.3)$$

$$W_{уд} = W_0 \cdot (S_i/S_0)^{0,8}, \quad (5.4)$$

где $Q_0 = 1,0$ см³/имп; $W_0 = 1200$ Дж/см³ при $S_0 = 20$ мм, т. е. при бурении имеет место более медленное увеличение производительности и снижение энергозатрат, чем для двухэлектродной стержневой системы (гл. 3). Этот эффект определяется специфическими условиями внедрения канала разряда и разрушения при бурении.

Для оценки влияния энерговклада при бурении нами из большого количества данных выбраны результаты для конкретной горной породы (микрокварцита) и близких условий выделения энергии. Производительность возрастает с увеличением энерговклада тем быстрее, чем больше S . При этом зависимости имеют насыщающийся характер, как и для двухэлектродной системы (гл. 3), а область насыщения смещается в большие значения энерговклада при увеличении S .

Полученные результаты позволяют сделать выводы: имеет место ограничение роста производительности бурения с увеличением энерговклада, а зона ограничения по энерговкладу зависит от расстояния между электродами; для заданного S имеет место определенная величина энерговклада, при которой производительность бурения наибольшая; ещё раз подчёркивается, что бурение скважин большого диаметра с увеличенными расстояниями между электродами более эффективно.

Таким образом, нами впервые экспериментально доказано, что увеличение производительности бурения при заданном расстоянии между электродами имеет физическое ограничение, обусловленное величиной энерговклада в канал разряда.

Из литературных источников следует, что энергозатраты изменяются с минимумом в функции энергии запасаемой ГИН. Для скважины диаметром 400 мм получены подобные зависимости в функции энерговклада при $S = 80$ и 120 мм. При этом с увеличением S минимум смещается в область больших значений энерговклада, как отмечается и в литературе для меньших S . Необходимо отметить, что расчёт энергии, запасённой ГИН, по (5.2), соответствующий минимуму энергозатрат согласуется с результатами приведёнными выше, несмотря на то, что выражение (5.2) получено в ограниченном диапазоне расстояний между электродами. Увеличение энерговклада больше значения соответствующего минимуму энергозатрат приводит к дальнейшему возрастанию производительности бурения. Следовательно, оптимизация ЭИ бурения по минимуму энергозатрат является частным случаем, который может быть реализован для конкретных условий бурения или по требованию заказчика.

5.4. Гранулометрический и фракционный состав шлама при ЭИ бурении.

Необходимым условием эффективного ЭИ бурения является своевременная и полная очистка призабойной зоны скважины от продуктов разрушения горной породы и продуктов разложения промывочной жидкости за промежуток времени между двумя импульсами. Для выбора условий удаления разрушенного материала необходимо знание физико-механических характеристик горной породы в целом и отдельных её фрагментов, в частности, гранулометрический и фракционный состав шлама. Крупность частиц шлама в значительной степени определяет конструктивные параметры бурового наконечника и бурового снаряда, поскольку необходимо добиваться не только отсутствия переизмельчения шлама, но и заклинивания бурового снаряда в скважине при прямой схеме, или закупорки шламопровода в снаряде при обратной схеме промывки.

В литературе отсутствуют систематические исследования по данному вопросу при ЭИ бурении. Имеются отдельные работы по анализу шлама для конкретных условий бурения при $S \leq 50$ мм. Нами проведён анализ гранулометрического и фракционного состава шлама как в литературных источниках, так и при бурении скважин большого диаметра с $S > 45$ мм.

Появление кусков шлама максимальных размеров событие случайное и относительно редкое. Наибольший интерес представляет анализ размеров наиболее крупных во фракции +20мм кусков. Средние размеры (длина l , ши-

рина b , толщина h) наиболее крупных кусков шлама микрокварцита и гранита в зависимости от S при практически одинаковом энергокладе $M = 18\text{--}22$ Дж/мм могут быть представлены линейными выражениями типа

$$\bar{l} = a \cdot S; \bar{b} = c \cdot S; \bar{h} = k \cdot S \quad (5.5)$$

где a, c, k – экспериментальные коэффициенты: для гранита $a = 0,8$; $c = 0,55$; $k = 0,25$, а для микрокварцита $a = 0,7$; $c = 0,46$; $k = 0,23$, т. е. имеет место удовлетворительное совпадение размеров наиболее крупных кусков шлама. Для средних размеров наиболее крупных кусков имеет место зависимость их от энергоклада в виде

$$\bar{l} = \bar{l}_0 - a_1 \cdot M; \bar{b} = \bar{b}_0 - c_1 \cdot M; \bar{h} = \bar{h}_0 - k_1 \cdot M, \quad (5.6)$$

где $\bar{l}_0, \bar{b}_0, \bar{h}_0$ – размеры кусков шлама при $M = 5$ Дж/мм; $a_1 = 0,375$, $c_1 = 0,45$; $k_1 = 0,15$. Из (5.6) следует, что с увеличением энергоклада размер наиболее крупных кусков уменьшается. Следовательно, варьируя энергоклад, можно регулировать размер наиболее крупных частиц шлама.

С точки зрения расчёта эффективной промывки скважины необходимо знание его фракционного состава в зависимости от условий бурения. В качестве основных факторов, оказывающих влияние на формирование фракционного состава нами определены: расстояние между электродами S , энергоклад M , крепость горных пород по шкале М.М. Протодяконова f .

В исследованном диапазоне $S = 10\text{--}120$ мм можно утверждать, что с увеличением S быстро уменьшается доля мелкого шлама и возрастает доля крупного. Это указывает на то, что с увеличением S эффективность ЭИ бурения существенно возрастает особенно при $S > 45$ мм.

Увеличение энергоклада вызывает переизмельчение частиц шлама (возрастает доля мелкой фракции (-5 мм)) и уменьшение доли крупных фракций. Так, увеличение энергоклада в 4,1 раза привело к приросту фракции -5 мм на 10 %, а доля самых крупных фракций ($+10, +20$ мм) снизилась на 6 %.

Фракционный состав шлама зависит от коэффициента крепости горных пород f . Для исследованных нами горных пород при $S < 45$ мм (песчаник $f = 8$, известняк $f = 10$, гранит $f = 16$, микрокварцит $f = 18$) увеличение крепости в 2,25 раза уменьшает долю мелкой фракции (-5 мм) на 19 % и повышает долю крупных ($+5, +10$ мм) на 9 % и 10 % соответственно, т. е. влияние крепости горных пород на фракционный состав шлама более сильное, чем влияние энергоклада.

Таким образом, фракционный состав шлама в диапазоне $S = 20\text{--}120$ мм, в первую очередь, зависит от расстояния между электродами – с увеличением S возрастает доля крупных фракций, увеличение крепости горных пород вызывает рост крупных фракций, а увеличение энергоклада приводит к возрастанию доли мелких фракций.

Полученные результаты позволяют осуществлять выбор и расчёт системы промывки и конструкции элементов ЭИ бурового снаряда.

5.5. Скорость ЭИ бурения.

Основным показателем эффективности процесса бурения является скорость. Для анализа скорости бурения в полевых условиях в зависимости от расстояния

между электродами S необходимо ограничить в узких пределах изменение энерговклада M и рассматривать процесс бурения для заданных диаметров буровых наконечников. На основании работ, выполненных разными авторами, нами проведен подобный анализ. При бурении микрокварцита (диаметры наконечников $D_{\text{нак}} = 120$ и 150 мм при энерговкладе $M = 34,0\text{--}42,4$ Дж/мм и $20,0\text{--}27,0$ Дж/мм соответственно), песчаника ($D_{\text{нак}} = 140$ мм и $M = 31,6\text{--}32,5$ Дж/мм), мерзлоты ($D_{\text{нак}} = 200$ мм $M = 28,1\text{--}28,9$ Дж/мм) увеличение расстояния между электродами приводит к линейному возрастанию скорости бурения в исследованном диапазоне изменения $S = 10\text{--}70$ мм. Увеличение диаметра наконечника при $S = \text{const}$ снижает скорость бурения. Например, для микрокварцита при $S = 20$ мм увеличение диаметра наконечника в 1,66 раза привело к снижению скорости бурения в 2,1 раза рис. 5.1, кривая 1, а для гранита при $S = 40$ мм увеличение $D_{\text{нак}}$ в 3 раза вызвало снижение скорости бурения в 2,6 раза. Следовательно, для сохранения или увеличения скорости бурения при повышении $D_{\text{нак}}$ необходимо увеличивать S .

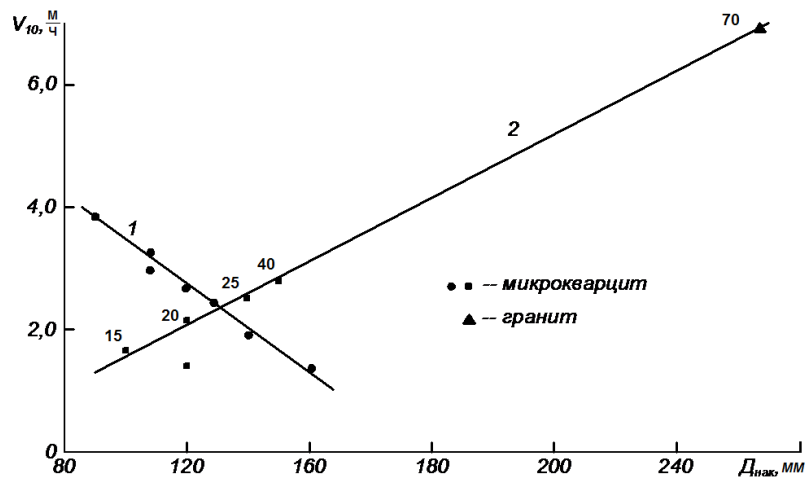


Рис. 5.1. Зависимость скорости бурения от диаметра наконечника при различных S :

1 — $S = 20$ мм — микрокварцит; 2 — $S = \text{var}$; цифры у точек — S в мм.

Результаты полевого бурения позволили выделить несколько буровых наконечников разного диаметра с одинаковым количеством электродов — одиннадцать. При этом энерговклад изменялся в диапазоне $M = 25,5\text{--}35,0$ Дж/мм (результаты относятся к бурению как микрокварцита, так и гранита). На рис. 5.1 кривая 2 приведена скорость бурения в зависимости от диаметра бурового наконечника при различных расстояниях между электродами (цифры у точек — расстояние S). Скорость бурения возрастает с увеличением $D_{\text{нак}}$, если при этом увеличивается расстояние между электродами.

Выше показано, что увеличение энерговклада увеличивает производительность разрушения и бурения горных пород, что неизбежно увеличит и скорость бурения. На рис. 5.2 приведены зависимости скорости бурения гранита от энерговклада для скважины большого диаметра ($D_{\text{нак}} = 360$ мм) при $S = 80$ и 120 мм.

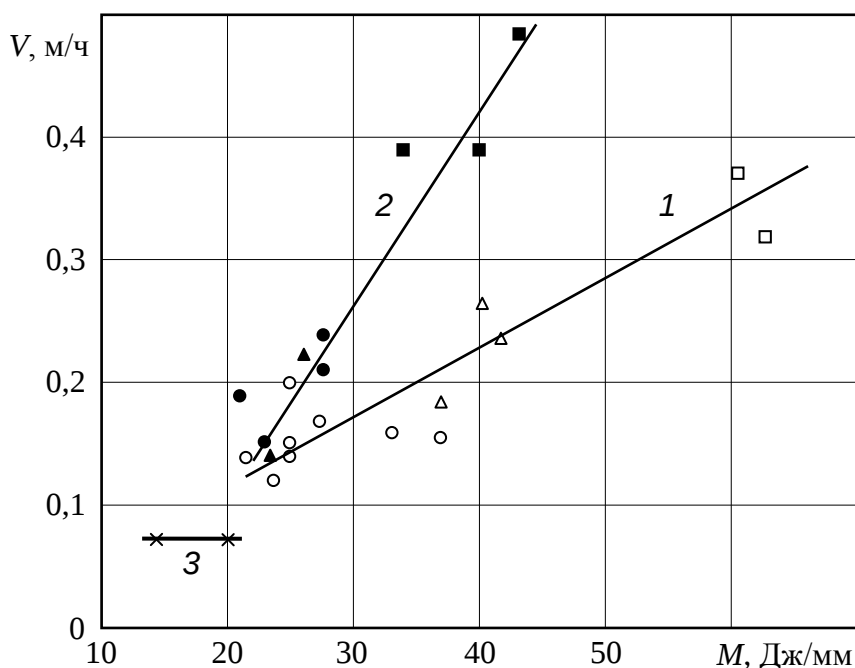


Рис. 5.2. Зависимость скорости бурения от энерговклада
1 – $S = 80$ мм; 2 – $S = 120$ мм; 3 – $S = 57$ мм (получено в Норвегии)

Скорость бурения возрастает с увеличением энерговклада и тем быстрее, чем больше расстояние между электродами: увеличение энерговклада в 1,74 раза ($M = 23\text{--}40$ Дж/мм) вызвало увеличение скорости бурения при $S = 80$ мм в 1,76 раза, а при $S = 120$ мм – в 2,66 раза. При этом отсутствует насыщение производительности бурения, т. е. возможно дальнейшее повышение скорости бурения с увеличением энерговклада. Следовательно, энерговклад является одной из важнейших характеристик регулирующих скорость ЭИ бурения скважин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открытие электроимпульсного эффекта в Томском политехническом институте позволило развивать на его основе технологии разрушения горных пород: дробление и измельчение, бурение скважин и проходка стволов, резание и др. Наибольшее развитие получила технология ЭИ бурения, доведённая до полевых испытаний. Дальнейший прогресс был заторможен рядом неблагоприятных обстоятельств объективного и субъективного характера (проанализированы в диссертации). Публикация в открытой печати ранее засекреченных результатов исследований и разработок по этой тематике вызвала интерес к ЭИ бурению у зарубежных компаний и создала предпосылки для возрождения и интенсификации работ, в особенности в области бурения глубоких скважин и скважин большого диаметра.

Результаты исследований и разработок, составляющих основу диссертации, можно обобщить в следующем виде:

1. Исследованы новые, не используемые ранее в ЭИ технологиях, синтетические жидкости и вода при повышенных давлениях и температурах. Показано, что буровые жидкости типа Versa Pro, Midel, ИБР могут быть использованы в ЭИ-технологии бурения. При совместном воздействии повышенных

давлений и температур электрическая прочность жидкости остаётся достаточной для бурения глубоких скважин.

2. Исследования электрической прочности горных пород при совместном воздействии повышенных давлений и температур, воспроизводящем условия в забое при бурении глубоких скважин (3000–4000 м), показали, что зависимость пробивного напряжения от давления и температуры для горных пород изменяется с максимумом при $P = 10$ МПа и $T = 50$ °С, подобно тому, что характерно для жидкости (бурового раствора Versa Pro). При этом во всем диапазоне исследованных давлений ($P = 35$ МПа) и температур ($T = 120$ °С) электрическая прочность горных пород выше, чем при атмосферном давлении и температуре 17 °С.

3. Установлено, что осуществление электрического пробоя горных пород и бетона на спаде импульса напряжения позволяет в 2,4 раза снизить как амплитуду напряжения, так и крутизну фронта импульса при сохранении 100 % вероятности внедрения разряда в твёрдое тело.

4. Для каждого межэлектродного расстояния имеет место оптимальное значение энерговклада, при котором энергозатраты минимальны. Дальнейшее увеличение энерговклада увеличивает объём откольной воронки, увеличивает производительность разрушения и, соответственно, скорость бурения. Использование шпуров при отбойке горной породы во много раз увеличивает производительность разрушения и уменьшает энергозатраты.

5. Совместное повышение гидростатического давления до 35,0 МПа и температуры до 120 °С приводит к уменьшению производительности ЭИ-разрушения и увеличению энергозатрат в 5–11 раз (в зависимости от вида горной породы). Наиболее значительные изменения происходят в диапазоне давлений 0,1–5,0 МПа и температур до 30 °С; преобладающим фактором является увеличение давления. Дальнейшее повышение давления и температуры слабо влияет на изменение производительности и энергозатрат. Увеличение расстояния между электродами значительно увеличивает производительность разрушения.

6. Форма и размеры электродов при ЭИ разрушении горных пород влияют на производительность и энергозатраты. Пластинчатые электроды имеют существенно лучшие характеристики разрушения по сравнению со стержневыми. При этом энергозатраты уменьшаются в 2,14 раза. Размер электродов (площадь контакта их с поверхностью горной породы) зависит от действующего напряжения: увеличение напряжения позволяет увеличивать размеры электродов. Максимальные размеры электродов, определяющие эффективную работу, должны выбираться из сопоставления вольт-секундных характеристик разрушаемой горной породы и рабочей жидкости.

7. Применение для резания горных пород в воде стержневой двухэлектродной системы при непрерывном её перемещении вдоль траектории реза позволяет в 10 и более раз уменьшить энергию, которую необходимо запасать в ГИН. При этом решается проблема надёжности работы высоковольтной изоляции, допускается применение воды в качестве рабочей жидкости, уменьшается капиталоемкость установки и повышается надёжность работы ГИН. Скорость резания, энергозатраты, ширина прорезаемой щели зависят от

шага перемещения электродной системы, оптимальное значение которого определяется энергией, запасённой ГИН, и длиной разрядного промежутка. Эффективность резания двухэлектродной перемещающейся системой при одинаковом расстоянии между электродами значительно выше, чем для многоэлектродной неподвижной системы с большей энергией, запасаемой ГИН.

8. Совокупность исследованных характеристик ЭИ бурения позволяет сделать обоснованное заключение об увеличении эффективности бурения при увеличении расстояния между электродами, увеличении диаметра скважины, увеличении энерговклада в канал разряда. Скорость бурения – важнейшая характеристика проходки скважин. При ЭИ бурении получен принципиально новый эффект – скорость бурения возрастает с увеличением диаметра скважины при оптимизации условий бурения: расстояние между электродами, рабочее напряжение, энерговклад, условия промывки. Скорость бурения возрастает с увеличением расстояния между электродами при неизменном диаметре бурового наконечника и уменьшается с увеличением диаметра бурового наконечника при неизменном расстоянии между электродами.

9. Обнаружено, что производительность ЭИ бурения для конкретного расстояния между электродами имеет ограничение, обусловленное энерговкладом. При этом увеличение расстояния между электродами вызывает более быстрое приращение производительности, а энерговклад, соответствующий ограничению прироста производительности, смещается в область больших значений. На основании этого можно утверждать, что максимальная скорость бурения может быть достигнута при определённом энерговкладе. Величина этого энерговклада значительно превышает энерговклад, соответствующий минимуму энергозатрат. Следовательно, оптимизация условий ЭИ бурения по минимуму энергозатрат – частный случай управления ЭИ-бурением.

10. При неизменном энерговкладе производительность ЭИ бурения в 1,4–1,9 раза меньше, чем для двухэлектродной экспериментальной системы электродов, что обусловлено специфическими условиями разрушения горной породы при бурении. Следовательно, определение показателей бурения на основании результатов для двухэлектродной системы некорректно.

11. Фракционный состав шлама, в первую очередь, зависит от расстояния между электродами. При этом увеличение S приводит к уменьшению доли мелких фракций и увеличению крупных. Увеличение крепости горных пород вызывает уменьшение доли мелких фракций и рост крупных. В меньшей степени на фракционный состав шлама влияет энерговклад. Полученные результаты позволяют более точно осуществлять выбор и расчёт как системы промывки скважины, так и расчёт элементов бурового снаряда с целью повышения эффективности ЭИ бурения.

12. Нами впервые проведены исследования электрической прочности горных пород в широком диапазоне изменения расстояний между электродами (10–300 мм) и предложены расчётные эмпирические зависимости пробивных напряжений от расстояния между электродами при многократном воздействии импульсного напряжения на горные породы, которые коррелируют с рабочими напряжениями при реальном бурении. Величина пробивного

напряжения горных пород при бурении имеет большую дисперсию и в результате многофакторного взаимодействия электрофизических свойств породы и жидкой среды, а также особенностей многократного воздействия импульсов напряжения при разрушении породы, слабо зависит от вида горной породы. Данная закономерность позволяет сделать предположение о перспективности бурения скважин большого диаметра с большими межэлектродными расстояниями ($S > 70$ мм). Для эффективного бурения при заданном межэлектродном расстоянии необходимо использовать максимальное значение U , равного рабочему напряжению.

13. Выполнен комплекс исследований механизмов отказов монолитной полимерной изоляции, технологии изготовления изоляторов и их отбраковки:

- на большом статистическом материале доказано, что точка перегиба на графике Вейбулла при длительном воздействии импульсного напряжения характеризует относительное количество технологических дефектов в партии образцов и число импульсов, необходимое для их отбраковки $t_{\text{опт}}$. Престрессинг уменьшает одноимпульсную электрическую прочность полиэтиленовой изоляции, которая изменяется с максимумом при воздействии испытательного напряжения $E_{\text{исп}} \leq 0,3E_0$ и отбраковке технологических дефектов при $t_{\text{исп}} = t_{\text{опт}}$. Престрессинг влияет на многоимпульсную электрическую прочность полиэтиленовой изоляции, но при этом число импульсов до пробоя на рабочем напряжении изменяется с максимумом при $E_{\text{исп}} = 1,33E_p$ и отбраковке технологических дефектов при $t_{\text{исп}} = t_{\text{опт}}$;

- на данном этапе развития ЭИ - бурения скважин в НИИ ВН разработана достаточно эффективная технология изготовления изоляторов для ЭИБС, которая позволила существенно увеличить «время жизни» изоляторов. А на основании достоверных статистических исследований поведения полимерной изоляции при длительном воздействии импульсного напряжения нами предложена методика отбраковки технологически дефектных изоляторов, что в свою очередь, увеличило среднюю наработку на отказ примерно на два порядка и значительно уменьшило вероятность отказа изоляторов;

- впервые прямыми измерениями установлено накопление ОЗ высокой концентрации в полимерной изоляции при длительном воздействии импульсного напряжения, что существенно влияет на процесс старения изоляции. Предложен способ отбраковки технологических дефектов в исходном состоянии (без приложения электрического поля) методом акустического зонда, путём измерения исходного (начального) ОЗ;

- обнаружено и исследовано трещинообразование в полимерных диэлектриках при длительном воздействии импульсного напряжения и предложен расчёт времени до зарождения трещин в зависимости от испытательной напряженности $E_{\text{исп}}$ на основе теории академика С.Н. Журкова. Возникновение субмикротрещин происходит стохастически во всём объёме изоляции и в «бездефектных» в исходном состоянии зонах. При этом в локальных зонах с увеличением времени воздействия напряжения возрастает концентрация и размер трещин, достигая тысяч ангстрем. Размер, количество, местоположение исходных дефектов в объёме изоляции не коррелируют с числом им-

пульсов до пробоя. При этом их форма, размер, цвет не претерпевают изменений в процессе нагружения электрическим полем до 10^7 – 10^8 имп.

В заключение считаю своим долгом напомнить, что основоположниками электроимпульсной технологии являются профессора А.А. Воробьёв, Г.А. Воробьёв, А.Т. Чепиков, И.И. Каляцкий, а основными разработчиками ЭИ способа бурения и разрушения горных пород - С.С. Сулакшин, Ю.Б. Фортес, Н.Е. Коваленко, Б.В. Сёмкин, С.Я. Рябчиков; разработчиками смежных тематик, обеспечивавших прогресс в области ЭИ технологии, - В.Я. Ушаков, А.А. Дульзон. Дальнейшее развитие ЭИ способа бурения стало возможным благодаря активной поддержки директора Института физики высоких технологий Томского политехнического университета В.В. Лопатина и руководителя лаборатории № 11 В.М. Муратова, всех сотрудников института, причастных к решению этой сложной проблемы. Работы по бурению скважин большого диаметра были выполнены благодаря заключению контрактов с фирмами Komatsu (Япония), Stat Oil и UnoDrill (Норвегия), Schlumberger (США), а развитию способа ЭИ резания горных пород помог контракт с Дрезденским техническим университетом (Германия).

Список основных публикаций автора

1. Важов В.Ф., Дмитриевский В.С., Сотников В.Г., Фортес Ю.Б. Исследование надежности полиэтиленовой изоляции на импульсах // Известия ТПИ. – 1967. – Т. 159. – С. 86–89.

2. Важов В.Ф., Дмитриевский В.С., Сквирская И.И., Сотников В.Г., Фортес Ю.Б. Разработка технологии изготовления полиэтиленовых центрирующих изоляторов // Сборник трудов «Электрофизическая аппаратура и электрическая изоляция». – М.: Изд-во Энергия, 1970. – С. 507–512.

3. Важов В.Ф., Дмитриевский В.С., Сквирская И.И., Сотников В.Г., Фортес Ю.Б. Исследование полиэтиленовых шайбовых изоляторов на импульсном напряжении // Сборник трудов «Электрофизическая аппаратура и электрическая изоляция». – М.: Изд-во Энергия, 1970. – С. 502–507.

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

5. Важов В.Ф., Сотников В.Г. Влияние испытательного напряжения на одноимпульсную электрическую прочность полиэтилена // Электрические материалы. – 1973. – № 12. – С. 3–4.

6. Важов В.Ф., Дмитриевский В.С., Сотников В.Г. Влияние электрического поля и некоторых геометрических факторов на срок службы полиэтиленовой изоляции // Электронная обработка материалов. – 1973. – № 3(51). – С. 87–89.

7. Важов В.Ф., Багин В.В., Сотников В.Г., Ушаков В.Я. Исследование «времени жизни» ПЭ изоляции на импульсном напряжении // Электричество. – 1977. – № 5.

8. Washov W.F., Ushakov V.Yk. Untersuchungen der statistischen Gesetzmäßigkeiten des stobspannungsdurchschlages der Polymerisolation // 22 Internationales wissenschaftliches kolloquium. Technische hochschule, Ilmenau. – 1977. – S. 59–62.

9. Boev S., Vajov V., Jgun D., Muratov V., Peltsman S., Levchenko B., Uemura K., Adam A. Electropulse technology of material distraction and boring // IEEE International Pulsed Power Conference. – USA, Baltimore. – 1977. – P. 220–225.
10. Важов В.Ф., Ефремова Г.В., Лебедев С.М., Робежко А.Л., Ушаков В.Я. Кинетика разрушения твёрдых полимеров при длительном нагружении электрическим полем // Физика твёрдого тела. – 1981. – Т. 23. – Вып. 11. – С. 3360–3364.
11. Важов В.Ф., Ефремова Г.В., Робежко А.Л., Ушаков В.Я. Изменение характеристик светорассеяния, как метод исследования электрического старения твёрдых диэлектриков // Письма в ЖТФ. – 1981. – Т. 7. – Вып. 3. – С. 155–158.
12. Важов В.Ф., Умнов А.Я., Лебедев С.М., Ушаков В.Я. Влияние частоты следования импульсов на число импульсов до пробоя // Электротехника. – 1982. – № 10. – С. 34–36.
13. Лебедев С.М., Важов В.Ф., Ушаков В.Я. Эффект объёмного заряда в полимерах при длительном воздействии электрического поля // Журнал технической физики. – 1983. – № 4. – С. 752–754.
14. Важов В.Ф., Лебедев С.М., Ушаков В.Я. Устройство для акустического зондирования объёмного заряда в твёрдом диэлектрике // Приборы и техника экспериментов. – 1983. – № 6. – С. 98–101.
15. Важов В.Ф., Умнов А.Я., Ушаков В.Я. К выбору условий отбраковки изоляционных элементов высоковольтных устройств // Электричество. – 1984. – № 2. – С. 66–70.
16. Важов В.Ф., Лопаткин С.А., Никитин В.В., Робежко А.Л., Сурнин В.А., Ушаков В.Я. О роли неоднородностей полимеров в развитии разрушений под действием электрического поля // Физика твёрдого тела. – 1985. – Т. 27. – Вып. 8. – С. 2361–2366.
17. Важов В.Ф., Дашковский А.Г., Ушаков В.Я. Определение размеров неоднородностей в полимерах решением обратной задачи светорассеяния // Известия вузов. Физика. – 1987. – № 3. – С. 103–105.
18. Важов В.Ф., Искандарова С.В. Определение критерия отбраковки полимерной изоляции // Электричество. – 1989. – № 5. – С. 68–70.
19. Важов В.Ф., Носков М.Д. Моделирование теплового пробоя неоднородных твёрдых диэлектриков в электрическом поле // Известия вузов. Физика. – 1996. – № 4. – С. 37–42.
20. Важов В.Ф., Сёмкин Б.В., Адам А.М. Оптимизация электроимпульсного разрушения горных пород и искусственных материалов // Известия вузов. Физика. – 1996. – № 4. – С. 106–109.
21. Воробьёв Г.А., Чепиков А.Т., Важов В.Ф. Критерий внедрения канала разряда в твёрдый диэлектрик, помещенный в изолирующую жидкость // Известия вузов. Физика. – № 12. – 1998. – С. 110–113.
22. Boev S., Vajov V., Jgun D., Levchenko B., Muratov V., Adam A., Uemura K. Destruction of granite and concrete in water with pulse electric discharges // 12 IEEE International Pulsed Power Conference, v. 2. – USA, Monterey, 1999. – P. 1369–1371.

23. Dulzon A., Vajov V., Jgun D., Muratov V. Electropulse wells drilling // International Conference on Pulsed Power Applications. Gelsenkirchen, 2001, Band 2. – P. E06/1–E06/5.

24. Jgun D.V., Jurkov M.Yu., Lopatin V.V., Muratov V.M., Vajov V.F., Gubsch I., Kunze G., Neubert M. Application of pulsed discharges for materials cutting // European Pulsed Power Symposium. French German Research Institute Saind Louis France. – 2002. – P. 22/1–22/4.

25. Важов В.Ф., Журков М.Ю., Муратов В.М. Эффективность резания горных пород электроразрядным способом перемещающейся электродной системой // Известия ТПУ. – 2004. – Т. 307. – № 6. – С. 72–75.

26. Dazkevich S.Y., Gafarov R.R., Lopatin V.V., Muratov V.M., Vazhov V.F. Pulsed Electrical strength of Liquids and Solid at High Pressure // Известие вузов. Физика. – 2006. – № 11. Приложение. – С. 484–486.

27. Важов В.Ф. Трещинообразование в полимерных диэлектриках при длительном воздействии электрического поля // Известия вузов. Физика. – 2007. – № 2. – С. 10–15.

28. Важов В.Ф., Журков М.Ю., Дацкевич С.Ю., К оценке формы и размеров электродов при электроимпульсном разрушении горных пород // Известия вузов. Физика. – 2008. – TS № 11/3. – С. 137–141.

29. Важов В.Ф., Журков М.Ю., Лопатин В.В., Муратов В.М. Резание горных пород электрическими импульсными разрядами подвижной электродной системой в воде // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2008. – № 2. – С. 70–77.

30. Vazhov V.F., Zhurkov M.Yu., Lopatin V.V., Muratov B.M. Electric – dischargcutting of rocks // Journal of Mining Science. – 2008. – Vol. 44. – № 2. – P. 176–182.

31. Важов В.Ф., Гафаров Р.Р., Дацкевич С.Ю., Журков М.Ю., Муратов В.М. Электроимпульсный пробой и разрушение гранита // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80. – Вып. 6. – С. 79–84.

32. Vazhov V.F., Gafarov R.R., Datskevich S.Yu., Zhurkov M.Yu., Muratov B.M. Electri-Pulse Breakdown and the Breakage of Granite // Technical Physics. – 2010. – Vol. 55. – № 6. – P. 833–838.

33. Vazhov V.F., Gafarov R.R., Datskevich S.Yu., Zhurkov M.Yu., Lopatin V.V., Muratov V.M., Jeffryes B. Breakage of Rocks by Pulsed Electric Discharge at Elevated Pressures and Temperatures // Technical Physics Letters. – 2011. – Vol. 37 – № 4 – P. 383–386.

34. Кузнецов Ю.И., Важов В.Ф., Журков М.Ю. Электрический пробой твёрдых диэлектриков и горных пород на спаде импульса напряжения // Известия вузов. Физика. – 2011. – 4. – 17–22.

35. Важов В.Ф., Дацкевич С.Ю., Журков М.Ю., Гафаров Р.Р., Кураков А.Д., Муратов В.М., Rodland A. Электрическая прочность гранита при электроимпульсном разрушении // Известия вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – 11/3. – С. 163–167.

36. Важов В.Ф., Муратов В.М., Левченко Б.С., Пельцман С.С., Жгун Д.В., Адам А.М. Отбойка горных пород электрическими импульсными разрядами // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 2. – С. 98–103.

37. Vazhov V.F., Datskevich S.Yu., Zhurkov V.Yu., Muratov V.M., Ryabchikov S.Ya. Grain Size Composition and Distribution in Drill Catting in the Electric Impulse Destruction of Rocks // Journal of Mining Science. – 2012. – V. 48. – № 1. – P. 103–109.

38. Важов В.Ф., Козлова Н.В. Импульсный электрический пробой воды и гранита // Электричество, 2012, №6. – С.73 –76

39. Важов В.Ф., Муратов В.М., Дацкевич С.Ю., Журков М.Ю., Гафаров Р.Р. Электрическая прочность горных пород на импульсном напряжении при воздействии высоких давлений и температур // Физика твердого тела. 2013, Т.55, вып.4. – С.666 –670

40. Важов В.Ф. Влияние престрессинга на импульсную электрическую прочность полимерной изоляции // Известия вузов. Физика, 2013, Т.56, №7/2. – С.170 –173

Патенты и авторские свидетельства

1. Патент RU 2123596C1 Электроимпульсный способ бурения скважин и буровая установка / Адам А.М., Важов В.Ф. Заявлено 14.10.1996. Опубликовано 20.12.1998. Бюл. № 35.

2. Патент RU 81258U1 Устройство для разрушения поверхностного слоя изделий из искусственных материалов и природного камня / А.М. Адам, В.Ф. Важов, М.Ю. Журков, В.М. Муратов от 29.10.2008. Опубл. 10.03.2009. Бюл. № 7.

3. Патент RU 82764U1 Электроимпульсный буровой наконечник / Важов В.Ф., Муратов В.М., Адам А.М., Дацкевич С.Ю. Заявлено 24.11.2008. Опубл. 10.05.2009.

4 Патент RU 2232271 C1 «Электроимпульсный способ разрушения горных пород / Важов В.Ф., Журков М.Ю., Муратов В.М. Заявлено 25.02.2003. Опубл.10.07.2004.

5. А. с. 920579 Способ контроля изоляции / Важов В.Ф., Ефремова Г.В., Робежко А.Л., Ушаков В.Я. Опубл. 14.11.1981.

6. А. с. 954900 Устройство для измерения распределения потенциалов в твёрдых диэлектриках / Важов В.Ф., Капишников Н.К., Лебедев С.М., Муратов В.М., Ушаков В.Я. Опубл. 4.05.1982.

7. А. с. 1029232. Электропроводящая композиция / Важов В.Ф. Опубл. 15.03.1983.

8. А. с. 1226321 Способ определения качества изоляции партии однотипных электротехнических изделий / Важов В.Ф., Лебедев С.М., Ушаков В.Я. Опубл. 9.06.1986.

9. А. с. 796914 Изолятор для электроимпульсного бурового снаряда / Важов В.Ф., Брылин В.И., Симонов В.Я. Опубл. 17.01.1969.

10. А. с. 971987 Буровой снаряд для проходки скважин электроимпульсным способом с непрерывной очисткой забоя от продуктов разрушения породы / Каляцкий И.И., Чепиков А.Т., Фортес Ю.Б., Побежимов Н.Ф., Зыков В.М., Рябчиков С.Я., Симонов В.Я., Клейн Р.Э., Ишмухаметов Ш.Т., Пельцман С.С., Важов В.Ф., Шишкин В.С. Оpubл. 25.02.1966.

11. Patent US 6, 164, 388 Electropulse method of holes boring and boring machine / Adam A., Vajov V., 26.12.2000.

12. Patent US 7,784,563 B2 Method, drilling machine, drill bit bottom hole assembly for drilling by electrical discharge by electrical discharge pulses / Rodland A., Lopatin V., Muratov V., Vajov V. Оpubл. 31.08.2010.

13. Патент RU 2464402C2 Электроимпульсный способ бурения скважин и буровое долото / Муратов В.М., Важов В.Ф., Лопатин В.В., Гафаров Р.Р., Дацкевич С.Ю., Журков М.Ю. Заявлено 23.12.2010. Оpubл. 20.10.2012. Бюл. № 29.

14. Патент RU 2445430C1 Электроимпульсная буровая установка / Муратов В.М., Адам А.М., Важов В.Ф., Лопатин В.В. Оpubл. 20.03.2012.

15. Патент RU 2477370C1 Электроимпульсный погружной бур/ Муратов В.М., Лопатин В.В., Важов В.Ф., Адам А.М., Дацкевич С.Ю., Журков М.Ю., Кураков А.Г., Rodland. Оpubл. 10.03.2013.

Подписано к печати 00.00.2013. Формат 60×84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл. печ. л. 2,73. Уч.-изд. л. 2,47.

Заказ 000-13. Тираж 100 экз.

ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

Тел/факс: +7 (3822) 56-35-35, www.tpu.ru