

На правах рукописи

ЖГУН ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПРОБОЯ И
РАЗРУШЕНИЯ ГРАНИТА И БЕТОНА В ВОДЕ.**

Специальность 05.14.12 – Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск-2000

Работа выполнена на кафедре Техники и электрофизики высоких напряжений Томского политехнического университета.

Научные руководители:

доктор технических наук, профессор

Каляцкий Иван Иванович

кандидат технических наук, доцент

Важов Владислав Федорович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Усов Юрий Петрович

кандидат технических наук, доцент

Сафронов Владимир Николаевич

Ведущая организация: Институт угля и углехимии СО РАН, г. Кемерово

Защита состоится 7 июля 2000 года в 15 часов на заседании диссертационного совета К 063.80.05 при Томском политехническом университете по адресу: 634034, г.Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан 29 мая 2000 года.

Ученый секретарь диссертационного Совета,
Д.т.н., профессор

А.А.Дульзон

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы:

Основной трудоемкой операцией при добыче и переработке полезных ископаемых является разрушение горных пород. К новым современным способам разрушения горных пород относятся электрофизические, так как они позволяют без промежуточной трансформации преобразовывать запасенную электромагнитную энергию непосредственно в работу разрушения.

Одним из перспективных направлений является разрушение горных пород электрическими разрядами, открытым в ТПУ электроимпульсным (ЭИ) способом. В этом способе рабочим инструментом является электрический импульсный разряд, формирующийся внутри горной породы. Разрушение горной породы происходит за счет суммарного действия механических напряжений, создаваемых вокруг канала электрического пробоя, вследствие высокого давления в канале и воздействия ударных волн. Возможность регулирования процесса разрушения за счет изменения энергии импульса и времени ее выделения дает достаточные предпосылки для разрушения прочных и сверхпрочных пород, руд и искусственных материалов.

Процесс ЭИ разрушения подробно изучен при использовании изоляционных жидкостей на нефтяной основе (трансформаторное масло, дизельное топливо). Однако их использование при разрушении горных пород зачастую нежелательно вследствие высокой стоимости и экологического загрязнения. Дальнейшее развитие ЭИ способа разрушения связано с необходимостью использовать в качестве изолирующей среды экологически безопасную и дешевую воду. Использование технической воды приводит к значительному снижению себестоимости разрушения, улучшению условий эксплуатации ЭИ установок и повышению безопасности при проведении работ. Поэтому в настоящее время реализация использования воды в качестве изоляционной жидкости при ЭИ разрушении горных пород (бурении, резании) является одной из актуальных задач.

Однако при практическом использовании воды имеется ряд

трудностей, которые не только тормозят, но и, по существу, не позволяют решить эту задачу при традиционном подходе к пробоя горной пород на фронте импульса напряжения (ФИН) или на плоской части прямоугольного импульса (ПИНФ). Главные из них: необходимость повышения амплитуды импульса для компенсации потерь энергии вследствие растекания токов из-за высокой электропроводности воды, а также необходимость увеличения крутизны фронта импульса напряжения по сравнению с использованием изоляционных жидкостей с $300 \div 500$ кВ/мкс до $2000 \div 3000$ кВ/мкс. Это не позволяет производить разрушение горных пород в воде при дециметровых межэлектродных расстояниях, для разрушения с низким уровнем энергозатрат. Поиск эффективных путей, позволяющих осуществлять ЭИ разрушение горных пород в воде при дециметровых межэлектродных расстояниях является весьма актуальным, т.к. позволит более полно реализовывать достоинства данного способа разрушения горных пород.

Нами предложено и экспериментально подтверждено преимущество использования пробоя горных пород в воде на спаде импульса напряжения (СИН). При этом показано, что эффективность разрушения по сравнению с пробоем на ФИН или ПИНФ не снижается при сохранении основных преимуществ.

Работа выполнялась в рамках единого госбюджетного заказ-наряда НИИ ВН при ТПУ, тема 4.11.96. «Исследование и разработка высоковольтных источников для электроимпульсных технологий» (1996 г.); контракта с фирмами Komatsu- Mitsui «Демонстрационные испытания макета установки по электроимпульсному бурению скважин различного диаметра» (1996-1997 г.); контракта с фирмой Komatsu «Электроимпульсная технология обработки материалов и сред» (1997-1998 г.); единого госбюджетного заказ-наряда ТПУ, тема 1.09.104 «Исследование пробоя и разрушения изоляции в импульсных электрических полях и электрических полях и объемных зарядов в воздухе в промежутках с движущимся барьером» (1999-2000 г.).

Цель работы: поиск путей снижения пробивных напряжений горных пород, увеличения вероятности внедрения разряда и снижения требований к

форме импульса напряжения для разрушения гранита и бетона в воде.

Основные задачи работы:

1. Исследовать пробивные напряжения гранита и бетона в воде от времени воздействия напряжения, параметров воздействующего импульса, расстояния между электродами при пробое на спаде импульса с целью выбора параметров импульса, обеспечивающих максимальную вероятность внедрения разряда в разрушаемый материал и минимальные пробивные напряжения.
2. Исследовать характеристики разрушения гранита и бетона в воде при пробое на спаде импульса напряжения при дециметровых межэлектродных расстояниях для определения режимов, обеспечивающих эффективное разрушение.
3. Разработать и испытать различные конструкции устройств для ЭИ разрушения горных пород в воде при дециметровых межэлектродных расстояниях, создать опытно демонстрационную установку.

Научная новизна работы:

При исследовании вольтсекундных характеристик (ВСХ) гранита и бетона в воде при пробое на спаде импульса напряжения для межэлектродных расстояниях 20÷150 мм и установлено:

-вероятность внедрения разряда в гранит и бетон при пробое на СИН по сравнению с пробоем на фронте импульса увеличивается вследствие изменения характера развития разряда по границе раздела «жидкость-твердое тело»;

-пробивное напряжение гранита при пробое на спаде импульса ниже на 40÷60% по сравнению с пробоем на фронте импульса и плоской части прямоугольного импульса вследствие изменения характера развития разряда;

-пробивное напряжение гранита возрастает при увеличении длительности фронта импульса и уменьшения длительности импульса.

-Реализовано разрушение гранита и бетона в воде при пробое межэлектродных расстояний до 300 мм и проведена оценка его эффективности.

-Предложены рекомендации по конструированию

породоразрушающих устройств, разработаны устройства электродных систем и подтверждена их работоспособность для разрушения в воде гранита и бетона при дециметровых межэлектродных расстояниях.

Автор защищает:

- Преимущества способа ЭИ разрушения гранита и бетона при пробое в воде не на фронте импульса, а на его спаде, что приводит к снижению пробивного напряжения и возрастанию вероятности внедрения разряда.
- Результаты исследований характеристик ЭИ пробоя и разрушения гранита и бетона в воде при межэлектродных расстояниях до 300 мм.
- Перспективность использования рассматриваемого способа пробоя и увеличения эффективности разрушения горных пород в воде.
- Техническую реализацию устройств для ЭИ разрушения гранита и бетона в воде.

Достоверность основных положений, выводов и рекомендаций гарантирована необходимым объемом экспериментальных данных, обеспечивающих статистический анализ результатов, использованием современных методик измерений и соответствующей аппаратуры, а также экспериментальным подтверждением эффективности разрушения гранита и бетона в воде при дециметровых межэлектродных расстояниях на опытно-демонстрационных устройствах.

Практическая ценность и реализация работы:

1. Установленное снижение пробивных напряжений гранита и бетона в воде на спаде импульса по сравнению с пробоем на фронте импульса позволяет конструировать технологические ЭИ установки с более низкими требованиями к параметрам разрушающего импульса (амплитуда и крутизна фронта импульса, время до пробоя), а следовательно к установке в целом.
2. В рамках контракта с фирмой «KOMATSU» в лабораторных условиях реализовано разрушение гранита и бетона в воде при межэлектродных расстояниях 100÷300 мм.
3. На основании полученных результатов разработаны и созданы опытные устройства для разрушения горных пород и бетона в воде: буровой наконеч-

ник для бурения скважин диаметром 300 мм; электродные системы для снятия поверхностных слоев бетона с дециметровыми межэлектродными расстояниями.

4. Результаты исследований могут быть использованы при разработке промышленных устройств для ЭИ разрушения горных пород в воде.

Апробация работы:

Основные положения и практические результаты работы докладывались и обсуждались на 11 и 12 IEEE International Pulsed Power Conferences (Балтимор 1997, Монтерей 1999 г., США), первой, второй, третьей и четвертой Международных научных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых им. М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 1997, 1998, 1999, 2000г.), четвертой и пятой областных научно-технических конференциях молодежи и студентов «Современные техника и технологии» (Томск, 1998, 1999г.), Международном семинаре «Нетрадиционные технологии в строительстве» (Томск, 1999 г.), пятом Всероссийском научно-техническом семинаре «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (Томск, 1999 г.), шестой Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2000 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Экологобезопасные технологии освоения недр Байкальского региона: современное состояние и перспективы» (Улан-Удэ, 2000 г.), на научно-практической конференции по горным ударам (Таштагол, 2000 г.), на юбилейной научно-практической конференции «Проблемы и пути эффективного освоения минерально-сырьевых ресурсов Сибири и Дальнего Востока» (Томск, 2000).

Публикации: по содержанию и результатам исследований опубликовано 24 работы.

Объемен структура работы: Диссертационная работа изложена на 124 страницах основного текста, содержит 58 рисунков, 11 таблиц; состоит из введения, четырех глав, основных выводов, библиографии, включающей 139 источников, 4 приложений на 18 страницах. Общий объем диссертации 142

страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность тематики исследований, выполнен анализ основных проблем исследований и определена цель работы, сформулирована научная новизна результатов, отражена их практическая ценность, дана общая характеристика работы.

Первая глава посвящена описанию методики проведения экспериментальных исследований, объектов исследований и использованию методов математической статистики для обработки экспериментов.

Исследования проводились на двух испытательных стендах, укомплектованных аппаратурой для регистрации тока в разрядной цепи и напряжения на нагрузке. На одном стенде проводились эксперименты по получению ВСХ пробоя гранита и бетона и их разрушению при межэлектродных расстояниях, не превышающих 100 мм. Второй стенд, укомплектованный двумя генераторами импульсных напряжений (ГИН) использовался для проведения экспериментов по пробое и разрушению гранита и бетона при межэлектродных расстояниях до 300 мм. Используемое оборудование позволяло варьировать параметры импульса в интервалах, имеющих место в ЭИ технологии:

- Амплитуда импульса до 700 кВ;
- Разрядная емкость 25000÷200000 пФ;
- Максимальная энергия в импульсе 3,2÷45 кДж;
- Индуктивность разрядного контура 10,7÷20,7 мкГн;
- Волновое сопротивление ГИН 10,3÷20,7 Ом

Для регистрации параметров импульсов высокого напряжения и тока использовались два запоминающих осциллографа С8-14, омический делитель напряжения, токовый шунт и пояс Роговского. Градуировка измерительной системы производилась в соответствии с ГОСТ 17512-82.

Эксперименты проводились в водопроводной воде с удельным сопротивлением $(3\div 5)10^3$ Ом см. В процессе проведения экспериментов

проводился контроль удельного сопротивления воды.

В качестве образцов горных пород использовались блоки гранита с различными механическими характеристиками (граносиенит $\sigma_{сж}=180$ МПа, гранит среднезернистый $\sigma_{сж}=160$ МПа, гранит мелкозернистый $\sigma_{сж}=233$ МПа). Образцы бетона готовились из бетона марки М300 Томского завода ЖБК.

Для определения параметров импульса холостого хода ГИН и параметров импульса на нагрузке при пробое использовалась методика, соответствующая стандартам Международной электротехнической комиссии.

Для исключения и уменьшения систематических ошибок при обработке опытных данных использовались методы математической статистики.

Во второй главе изложены результаты исследований по пробое гранита и бетона в воде на спаде импульса напряжения.

Традиционно, пробой горных пород осуществлялся на фронте импульса (ФИН) (рис.1а) или плоской части прямоугольного импульса напряжения (ПИНФ) (рис.1б). Осуществление пробоя на спаде импульса (СИН) (рис.1в) является новым подходом для разрушения горных пород, поэтому требуется изучить изменение пробивного напряжения горных пород от времени приложения напряжения.

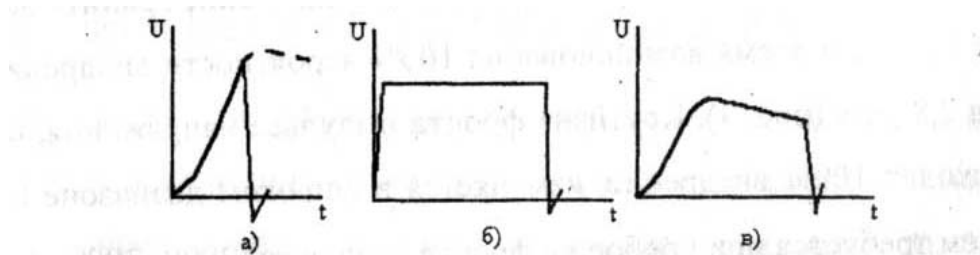


Рис.1 Пробой на ФИН (а), ПИНФ (б) и СИН (в).

В результате проведенных исследований установлено, что, как и при пробое на ФИН, для пробоя гранита в воде на СИН характерна критическая экспозиция напряжения $t_{кр}$, менее которой вероятность внедрения максимальная и достигает 100%. При времени до пробоя $t_{пр} > t_{кр}$ вероятность

внедрения резко снижается. Но, в отличие от пробоя на ФИН, значение $t_{кр}$ при пробое на СИН существенно больше (в 10÷12 раз). При увеличении межэлектродного расстояния при пробое на СИН величина $t_{кр}$ линейно возрастает и не зависит от вида горной породы (рис.2). Все приведенные нами зависимости построены для случая 100% внедрения разряда в гранит и бетон. Таким образом установлено, что критическая экспозиция напряжения

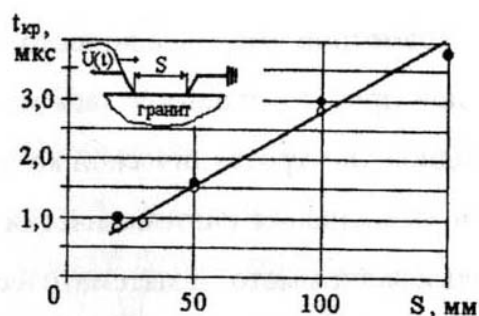


Рис.2 Зависимость критической экспозиции напряжения от межэлектродного расстояния для гранита и бетона. о- гранит; •- бетон.

Проведенными ранее в ТПУ исследованиями установлено, что пробивное напряжение горных пород независимо от окружающей жидкости возрастает при увеличении крутизны фронта импульса при пробое на ФИН, и уменьшении длительности импульса при пробое на ПИНФ. Проведенными нами исследованиями по пробоею гранита на СИН установлено, что при увеличении длительности фронта импульса в 3 раза пробивное напряжение гранита возрастает в 1,6 раза, при этом время возникновения 100% вероятности внедрения увеличивается в 2,8 раза (рис. 3). Крутизна фронта импульса напряжения, при которой происходит 100% внедрение, изменяется в широком диапазоне (табл.1) и меньше, чем требуется при пробое на фронте

Таблица 1.

Длительность фронта импульса $t_{ф}$, мкс	0,25	0,35	0,625	0,75	Примечание
Максимальная крутизна фронта импульса $A_{макс}$, кВ/мкс	1050	730	430	375	$A_{макс} = U_{пр}/t_{пр}$
Минимальная крутизна фронта импульса $A_{мин}$, кВ/мкс	560	530	290	265	$A_{мин} = U_{пр}/t_{ф}$

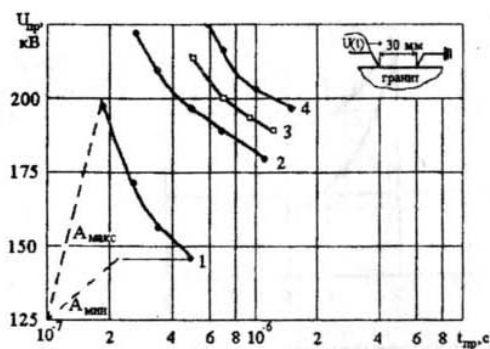


Рис.3 Вольтсекундные характеристики пробоя гранита в воде при одинаковой длительности импульса ($t_{и} \approx 3$ мкс).

1- $t_{ф}=0,25$ мкс; 2- $t_{ф}=0,35$ мкс; 3- $t_{ф}=0,625$ мкс; 4- $t_{ф}=0,75$ мкс.

По литературным и полученным нами данным была проанализирована зависимость минимального пробивного напряжения от длительности фронта импульса (рис.4). Установлено, что длительность фронта, при которой имеет место минимальное пробивное напряжение составляет $t_{ф} = 0,1-0,2$ мкс. Этот эффект зависит, в первую очередь, от условий формирования объемного заряда в жидкости вблизи электродов и скорости развития разряда в твердом

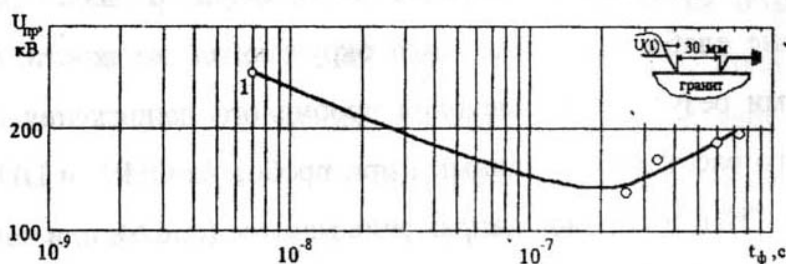


Рис.4 Зависимость минимального пробивного напряжения гранита в воде от длительности фронта импульса. Точка 1- данные В.И. Брылина.

Установлено, что увеличение длительности импульса приводит к снижению пробивного напряжения гранита, а при пробое на фронте длительность импульса не влияет на величину пробивного напряжения (рис.5). Это обусловлено, главным образом, зависимостью скорости развития разряда от величины воздействующего напряжения: чем больше длительность импульса, тем выше скорость развития разряда и пробой происходит, по сравнению с импульсом имеющим меньшую длительность, за более короткое время или при более низком напряжении.

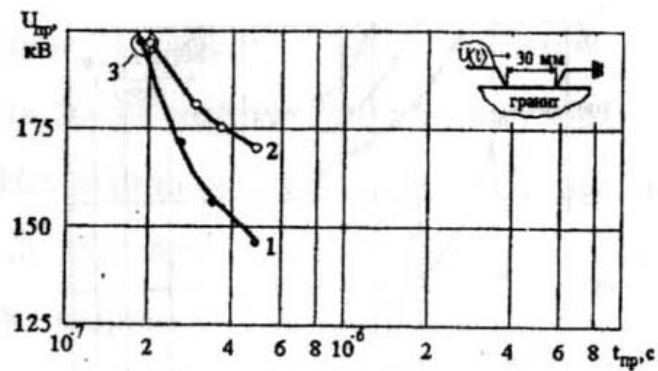


Рис.5 Вольтсекундные характеристики пробоя гранита в воде при одинаковой длительности фронта импульса ($t_{\text{ф}} \approx 0,25$ мкс).
1- $t_{\text{н}}=3,15$ мкс; 2- $t_{\text{н}}=3,75$ мкс; 3- область пробоя на фронте импульса.

Из-за отсутствия необходимых данных по пробое горных пород в воде проводилось сравнение полученных результатов с данными по пробое гранита в трансформаторном масле. Такое сравнение правомочно, исходя из известных механизмов развития разряда, как в жидкости, так и в твердом теле. Например, как показано в работах И.И. Каляцкого и В.С. Малахова, пробивное напряжение горных пород не зависит от вида жидкости. По данным В.Я. Ушакова характер развития разряда по поверхности твердого диэлектрика в приэлектродной зоне слабо зависит от вида окружающей жидкости. Сравнивая полученные нами результаты изменения пробивного напряжения гранита от межэлектродного расстояния с данными при пробое на ФИН и ПИНФ установлено, что на СИН пробивное напряжение меньше (рис.6): при фиксированном времени до пробоя пробивное напряжение гранита на СИН снижается на 40÷60% (табл.2). Необходимо отметить, что прочность гранита на сжатие в наших экспериментах составляла $\sigma_{\text{сж}} = 160 \div 180$ МПа, а при пробое на ФИН $\sigma_{\text{сж}} = 100 \div 120$ МПа.

Таблица 2

Порода	S, мм	$t_{\text{пр}}$, мкс	Пробивное напряжение			$U_{\text{п}} - U_{\text{с}} / U_{\text{п}}$	$U_{\text{ф}} - U_{\text{с}} / U_{\text{ф}}$
			На ПИНФ $U_{\text{п}}$, кВ	На ФИН $U_{\text{ф}}$, кВ	На СИН $U_{\text{с}}$, кВ		
Гранит	20	0,5	258	310	130	0,5	0,58
	30		281	395	175	0,38	0,56

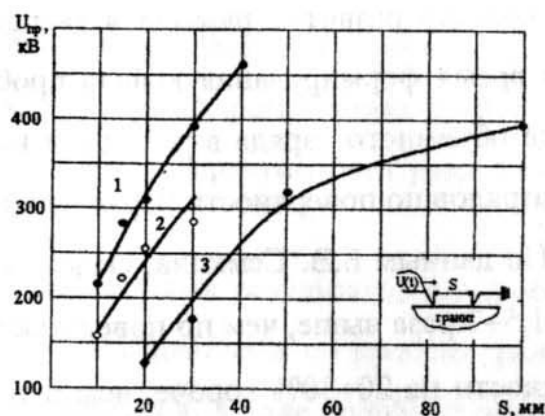


Рис.6 Зависимость импульсного пробивного напряжения от расстояния между электродами. Время до пробоя $t_{пр} = 0,5 \cdot 10^{-6}$ с.
1-Пробой в трансформаторном масле на ФИН. 2- Пробой в трансформаторном масле на ПИНФ. 3- Пробой в воде на СИН.

Разряд в диэлектрике начнется в том случае, если напряжение приложенное к образцу превысит напряжение зажигания разряда. Напряжение зажигания разряда в жидкости меньше, чем в твердом диэлектрике, поэтому разряд первоначально начинает развиваться в жидкости. По мере развития разряда по поверхности вглубь промежутка у электродов образуется объемный заряд (ОЗ), который приводит к выравниванию электрического поля в жидкости. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к тому, что напряженность на границе ОЗ возрастает, и происходит зажигание разряда в твердом диэлектрике. Напряжение зажигания разряда в твердом диэлектрике U_3^T возрастает с увеличением крутизны фронта импульса, поэтому при воздействии ПИНФ напряжение зажигания разряда больше, чем при пробое на ФИН или СИН, т.к. крутизна фронта импульса на ПИНФ в десятки раз выше. Поэтому, несмотря на одинаковый дальнейший характер развития разряда при пробое на СИН и ПИНФ, пробивное напряжение на ПИНФ больше, чем на СИН.

При формировании канала пробоя на ФИН напряжение зажигания разряда в твердом диэлектрике U_3^T мало отличается от такового на СИН. Но после достижения величины U_3^T напряжение продолжает возрастать и все процессы формирования канала пробоя в твердом диэлектрике завершаются на фронте импульса. При этом возрастает напряженность на границе объемного заряда в жидкости, возрастает скорость развития разряда в твердом диэлектрике и в жидкости, сокращается время формирования канала

пробоя. Увеличение напряженности на границе объемного заряда в жидкости вызывает дальнейшее развитие стримерных разрядов по поверхности параллельно с разрядом внутри твердого диэлектрика. По данным Б.В. Семкина, скорость развития разряда в твердом диэлектрике в $1,5 \div 3$ раза выше, чем по поверхности, но учитывая, что путь разряда по поверхности на $20 \div 30\%$ короче, чем в твердом диэлектрике, возможно опережение разрядом по поверхности разряда в твердом диэлектрике. При пробое на СИН, разряд в твердом диэлектрике развивается при неизменном и даже медленно снижающемся напряжении, поэтому разрядные процессы в жидкости происходят менее интенсивно, чем на ФИН. В результате, вероятность завершения разряда внутри твердого тела резко возрастает и достигает, как и в случае пробоя на ПИНФ, величины 100%.

В результате исследований пробоя гранита и бетона в воде на спаде импульса напряжения установлено:

- осуществление пробоя на СИН приводит к возрастанию вероятности внедрения разряда в гранит до 100% при времени воздействия напряжения существенно больше, чем на ФИН и с увеличением межэлектродного расстояния вероятность внедрения не снижается;
- при пробое гранита имеет место оптимальная длительность фронта импульса ($t_{\phi} = 0,1 \div 0,2$ мкс) при которой величина пробивного напряжения гранита минимальна;
- увеличение длительности фронта импульса $t_{\phi} > 0,2 \cdot 10^{-6}$ с и уменьшение длительности импульса приводит к возрастанию пробивного напряжения гранита;
- при пробое на СИН пробивное напряжения гранита на 55-58 % ниже, чем при пробое на ФИН и на 38-50% ниже, чем на ПИНФ;
- требования к форме импульса при пробое на СИН снижаются: уменьшается крутизна фронта и амплитуда импульса напряжения, увеличивается время до пробоя. Это облегчает конструирование и условия работы источников высокого напряжения при ЭИ разрушении горных пород.

Третья глава посвящена исследованию пробоя и разрушения гранита и бетона в воде при межэлектродных расстояниях до 300 мм. Данные исследования проводились для оценки эффективности разрушения гранита и бетона в воде при пробое на СИН.

Сравнение полученных нами результатов по пробоею гранита и бетона в воде на СИН проводилось с данными по пробоею гранита и бетона в трансформаторном масле на ФИН, т.к. в воде подобных экспериментов не проводилось. Установлено, что и для дециметровых межэлектродных расстояний при пробое на СИН происходит снижение пробивного напряжения и увеличение времени до пробоя по сравнению с пробоем на ФИН. В табл.3 приведены результаты сравнения для гранита и бетона.

Таблица 3

Порода	S, мм	$U_{пр}^c$, кВ	$U_{пр}^ф$, кВ	$t_{пр}^c$, мкс	$t_{пр}^ф$, мкс	$t_{пр}^c / t_{пр}^ф$	$U_{пр}^c / U_{пр}^ф$
Гранит	100	350	660	0,6	0,3	2,0	1,89
Бетон	100	240	300	0,35	0,27	1,3	1,25

В табл.3 $U_{пр}^c$, $t_{пр}^c$ - пробивное напряжение и время до пробоя на СИН в воде; $U_{пр}^ф$, $t_{пр}^ф$ - пробивное напряжение и время до пробоя на ФИН; S- межэлектродное расстояние.

В реальных технологических процессах ЭИ разрушения (бурение, резание) на горную породу происходит многоимпульсное воздействие. Поэтому оценка эффективности процесса разрушения гранита и бетона проводилась при воздействии нескольких импульсов и неизменном положении электродов.

Проведенными исследованиями по многоимпульсному разрушению гранита и бетона в воде установлено, что удельные энергозатраты изменяются в зависимости от количества воздействующих импульсов. Изменение удельных энергозатрат от числа воздействующих импульсов имеет минимум. Число импульсов, при котором наблюдается минимум удельных энергозатрат, для расстояний между электродами 100÷300 мм происходит при воздействии 2÷4 импульсов.

При многоимпульсном воздействии увеличение межэлектродного рас-

стояния от 10 до 300 мм (30 раз) приводит к возрастанию удельного объема разрушения в 1110 раз (с 0,154 до 171 см³/имп), при этом удельные энергозатраты уменьшаются в 14,5 раза (от 1450 до 100 Дж/см³). Максимальная глубина откольной воронки линейно возрастает с увеличением межэлектродного расстояния. Полученные результаты аналогичны данным по разрушению горных пород в трансформаторном масле на ФИН и ПИНФ, что свидетельствует об их достоверности.

В результате проведенных исследований по разрушению гранита и бетона в воде установлено:

- принципиальная возможность разрушения гранита и бетона в воде при расстояниях между электродами до 300 мм;
- использование пробоя на СИН позволяет в $1,3 \div 2$ раза увеличить время до пробоя, что приводит к снижению пробивного напряжения горной породы в $1,25 \div 1,9$ раза без уменьшения эффективности процесса;
- при многоимпульсном воздействии на гранит удельные энергозатраты на разрушение изменяются от числа поданных импульсов, минимум энергозатрат наблюдается при воздействии $2 \div 4$ импульсов;
- разрушение гранита и бетона в воде при пробое на СИН не менее эффективно, чем в трансформаторном масле при пробое на ФИН.

В четвертой главе проведены исследования эффективности режимов разрушения гранита и бетона при некоторых технологических операциях: отбойка от массива породы, разрушение поверхностных слоев бетонных изделий, предложены рекомендации к конструированию электродных систем для работы в воде, разработаны и испытаны устройства для разрушения гранита и бетона.

В рамках контракта с японской фирмой Komatsu «Электроимпульсная технология обработки материалов и сред» (1997-1998 г.) проведены эксперименты по разрушению гранита с предварительно забуренными шпурами. Целью экспериментов являлось определение возможности отрыва кусков гранита от массива при проходке стволов большого диаметра, туннелей. Установлено, что при расстояниях между электродами $200 \div 300$ мм и глубине

шпуров 50÷100 мм возможно производить отрыв гранита от массива при многоимпульсном воздействии. Увеличение глубины шпуров с 50 до 100 мм, при расстоянии между ними 300 мм, приводит к увеличению удельной производительности импульса с 391 до 1031 см³/имп.

Изготовлены и испытаны электродные системы для разрушения поверхностного слоя бетона с расстоянием между электродами 90 мм. Разрушение поверхности бетона происходит с низкими удельными энергозатратами. Производительность очистки поверхности зависит от частоты следования импульсов и скорости перемещения электродов. Показатели разрушения поверхности бетона М300 приведены в таблице 4.

Таблица 4

Режим работы	Циклический	Непрерывный
Рабочее напряжение, кВ	320	320
Глубина очистки, см	2,9	2,2
Разрушенный объем за один импульс, см ³ /имп	21,4	41,8
Время на разрушение, сек	50	15
Удельные энергозатраты, Дж/см ³	80	41
Затраты энергии на единицу площади, кВт·ч/м ²	0,9	0,25
Скорость очистки, м ² /час	4,5	6,8
Частота следования импульсов, имп/сек	1,7	1,5

Так как при работе в воде электродная система имеет низкое сопротивление (десятки Ом), то происходит снижение амплитуды импульса напряжения. По данным А.Ф. Усова, при сопротивлении нагрузки меньше 100 Ом необходимо применять специальные схемы формирования импульсов напряжения, вместо ГИН по схеме Аркадьева- Маркса. Эксперименты проводились с целью выбора соотношения между сопротивлением нагрузки (электродной системы) и волновым сопротивлением генератора $Z_{гин}$, при котором снижение амплитуды импульса напряжения незначительно. Установлено, что при соотношении сопротивления нагрузки (электродной системы) в воде к волновому сопротивлению ГИН $R_{нагр}/Z_{гин} > (4÷5)$, снижение амплитуды напряжения составляет 15÷20%. (рис.7). Дальнейшее увеличение данного соотношения слабо влияет на изменение снижения амплитуды

импульса. Это позволяет, при параметрах имеющихся ГИН ($Z_{\text{гин}} = 10 \div 20 \text{ Ом}$), осуществлять успешное разрушение горных пород и бетона в воде при

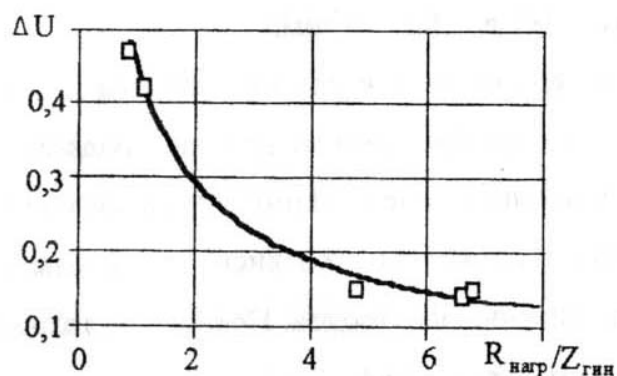


Рис.7 Зависимость снижения напряжения на нагрузке ΔU от величины соотношения сопротивления нагрузки $R_{\text{нагр}}$ и волнового сопротивления ГИН $Z_{\text{гин}}$. $C_{\text{гин}} = 0,035 \text{ мкФ}$.

Кроме этого потери энергии в предпробивной стадии и снижение амплитуды импульса происходят из-за токов растекания с поверхности электродной системы. Величина токов растекания определяется как площадью электродов, так и напряженностью на их поверхности. Исследованиями установлено, что при пробое в воде напряженность электрического поля на элементах электродной системы оказывает больше влияния на потери энергии в предпробивной стадии, чем их площадь. Для снижения потерь энергии предложено нерабочие элементы электродной системы выполнять такой конфигурации, чтобы максимальная напряженность на их поверхности не превышала $E_{\text{макс}} \leq (40 \div 50) \text{ кВ/см}$.

Нами показано, что имеющая место низкая надежность работы полиэтиленовой изоляции в воде определяется несмачиваемостью ее поверхности, так как имеющаяся на поверхности полиэтилена воздушная прослойка создает благоприятные условия для развития скользящих разрядов. Повышение надежности работы твердой изоляции электродных систем может быть достигнуто двумя путями. Во-первых, необходимо использовать в качестве изоляции хорошо смачиваемые в воде материалы (резину, керамику, стекло и т.д.). Во-вторых, в точке касания изоляции и металлического электрода (так называемая «тройная точка») необходимо

создавать напряженность на поверхности электрода ниже, чем напряженность зажигания разряда по поверхности изоляции в воде. В этом случае возможно использование материалов для изоляции с плохо смачиваемой поверхностью (полиэтилен, фторопласт и т.д.). На основании проведенных исследований предложена конструкция и изготовлен буровой наконечник для бурения скважин в воде диаметром 270 мм и расстоянием между электродами 90 мм, который в настоящее время проходит успешные испытания.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложен способ осуществления пробоя горных пород и искусственных материалов в воде на СИН, который позволяет на 40-60% снизить уровень пробивных напряжений по сравнению с пробоем на ФИН и ПИНФ. Вероятность внедрения составляет 100% при соблюдении условия $t_{пр} < t_{кр}$.
2. Обнаружено существование оптимальной длительности фронта импульса, при которой пробивное напряжение горной породы в воде минимальное. При пробое гранита оптимальная длительность фронта импульса составляет $t_{ф}=0,1-0,2$ мкс, для расстояния между электродами 30 мм. Уменьшение длительности импульса приводит к возрастанию пробивного напряжения.
3. При осуществлении пробоя на СИН требования к форме импульса напряжения становятся менее жесткими по сравнению с ФИН, уменьшается крутизна фронта импульса напряжения ($A \leq 1000$ кВ/мкс), увеличивается время до пробоя, снижается пробивное напряжение.
4. Впервые проведено разрушение гранита и бетона в воде для межэлектродных расстояний до 300 мм и показано, что разрушение на СИН в воде не менее эффективно, чем на ФИН в изоляционных жидкостях.
5. Показана возможность отрыва породы от массива при наличии в ней шпуров при расстояниях между электродами 200-300 мм, при этом удельная производительность импульса возрастает с увеличением глубины шпура.
6. Предложены рекомендации по конструированию породоразрушающих устройств для работы в воде. Разработаны: устройства для разрушения поверхностного слоя бетона; двухэлектродные устройства для резания щелей в

граните и бетоне; буровой наконечник диаметром 270 мм для бурения скважин в воде.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Бажов В.Ф., Жгун Д.В. Бурение скважин электрическими импульсными разрядами.// Тезисы докладов Первого международного симпозиума «Молодежь и проблемы геологии».- Томск: Изд. ТПУ, 1997. С.163-164.
2. Исследование процесса бурения горных пород и искусственных материалов электрическими импульсными разрядами. Отчет о НИР НИИ ВН при ТПУ; Руководитель Боев С.Г.-№ГР 02.9.70 0 03478. УДК 622.243.94 (088.8)- Томск, 1997. 51с.
3. Исследование электроимпульсного разрушения гранита в воде. Отчет о НИР НИИ ВН при ТПУ; Руководитель Бажов В.Ф.- №ГР 02.9.70 0 04910 УДК 622.243.94 (088.8)-Томск, 1997.36с.
4. Электроимпульсное разрушение гранита и бетона в воде. Отчет о НИР НИИ ВН при ТПУ; Руководитель Боев С.Г.- №ГР 02.9.80 0 00133 УДК 622.243.94 (088.8)- Томск, 1997. 57 с.
5. Электроимпульсное разрушение материалов в воде при дециметровых промежутках. Отчет о НИР НИИ ВН при ТПУ; Руководитель Боев С.Г.- №ГР 02.9.70 0 04933. УДК 622.243.94 (088.8)- Томск, 1997. 119 с.
6. S. Boev, V. Vajov, D. Jgun, V. Muratov, S. Peltsman, A. Adam, K. Uemura. Electropulse technology of boring.// Abstract of 11th IEEE International Pulsed Power Conference-USA, Baltimore, 1997. p.55.
7. S. Boev, V. Vajov, D. Jgun, V. Muratov, S. Peltsman, A. Adam, K. Uemura. Electropulse technology of material destruction and boring.// Digest of Technical Papers 11th IEEE International Pulsed Power Conference- USA, Baltimore, 1998 Vol.1.pp.220-225.
8. V.Vazhov, D. Zhgun. Prospect of electropulse drilling of rock in water.// Abstract of the Second Russian- Korean International Symposium on Science and Technology. Russian, Tomsk, 1998. p.55.
9. Жгун Д.В. Перспективы электроимпульсного бурения горных пород в во-

де.// Материалы докладов Второй международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых им. Академика М.А. Усова. Ч.2-Томск: Изд. НТЛ, 1998. С.65-66.

10. Жгун Д.В., Кругляков О.Г., Важов В.Ф. Новые аспекты электроимпульсного разрушения в воде.// Сб. статей Четвертой областной научно- практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Томск: Изд. ТПУ, 1998. С.32.

11.Жгун Д.В, Важов В.Ф. Разрушение поверхностного слоя бетона электрическими импульсными разрядами.// Сб. статей Четвертой областной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Томск: Изд. ТПУ, 1998. С.32-33.

12. Патент РФ № 2142562. Адам А.М., Боев С.Г., Важов В.Ф., Жгун Д.В., Левченко Б.С., Муратов В.М., Пельцман С.С. Электроимпульсный способ разрушения горных пород и искусственных материалов. Приоритет от 04.11.1999.

13. S. Boev, V. Vajov, D. Jgun, B. Levchenco, V. Muratov, K. Uemura. Destruction of granite and concrete in water with pulse electric discharges.// Abstract of 12th IEEE International Pulsed Power Conference- USA, Monterey,- 1999- p.34.

14. S. Boev, V. Vajov, D. Jgun, B. Levchenco, V. Muratov, A. Adam, K. Uemura. Destruction of granite and concrete in water with pulse electric discharges.// Digest of Technical Paper 12th IEEE International Pulsed Power Conference- USA, Monterey, 1999.pp.1369-1371.

15. Боев С.Г., Важов В.Ф., Жгун Д.В., Каляцкий И.И. Исследование условий разрушения материалов электрическими импульсными разрядами.// Тезисы докладов Всероссийского электротехнического конгресса "На рубеже веков: итоги и перспективы". Т.1. Москва, 1999.

16. Жгун Д.В. Некоторые вопросы конструирования бурового наконечника для электроимпульсного бурения в воде.// Труды Третьего Международного им. Академика М.А. Усова научного симпозиума студентов, аспирантов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр». Томск: ТПУ, 1999.

С.281-282.

17. П.Важов В.Ф., Жгун Д.В., Левченко Б.С., Муратов В.М., Пельцман С.С. Технология разрушения горных пород электрическими импульсными разрядами.// Сб. научных трудов 5-ой НТК "Перспективные материалы, технологии, конструкции". -Красноярск: Изд. КГАМиЗ, 1999. С.178-181.

18. Бажов В.Ф., Жгун Д.В., Левченко Б.С., Муратов В.М. Особенности электроимпульсного разрушения гранита и бетона в воде.// Материалы международного научно-технического семинара "Нетрадиционные технологии в строительстве". 4.1. Томск: Изд. ТГАСУ, 1999. С. 231-324.

19. Бажов В.Ф., Жгун Д.В., Муратов В.М. Экологичная и энергосберегающая технология разрушения горных пород и искусственных материалов электрическими импульсными разрядами.// Тезисы докладов Международной НТК "Энергосбережение, экология и безопасность". Тула: Изд. ТулГУ, 1999. С. 16-17.

20. Важов В.Ф., Жгун Д.В. Исследование пробоя горных пород и бетона в воде электрическими импульсными разрядами.// Материалы докладов 5-ой Всероссийской НТК "Энергетика: экология, надежность, безопасность". Томск: Изд. ТПУ, 1999. С.73-75.

21. Важов В.Ф., Жгун Д.В., Муратов В.М. Исследование разрушения гранита в воде при использовании дециметровых промежутков.// Материалы докладов 5-ой Всероссийской НТК "Энергетика: экология, надежность, безопасность", Томск: Изд. ТПУ, 1999. С.75-77.

22. Бажов В.Ф., Жгун Д.В. Муратов В.М. Электроимпульсный способ разрушения горных пород.// Материалы Всероссийской НПК «Экологобезопасные технологии освоения недр Байкальского региона: современное состояние и перспективы» (к 300-летию учреждения Приказа рудокопных дел). Улан-Удэ: Изд. БНЦ СО РАН, 2000. С.95-100.

23. Важов В.Ф., Жгун Д.В. Муратов В.М. Применение электроимпульсного разрушения горных пород и бетона для строительных нужд.// Материалы Международной НПК «Технология энергосбережения, строительство и эксплуатация инженерных систем». СПб.: Изд. СПбГТУ, 2000. С.51-53.

24. Вазов В.Ф., Жгун Д.В., Муратов В.М. Электроимпульсный способ бурения скважин.// Материалы юбилейной научно- практической конференции «Проблемы и пути эффективного освоения минерально-сырьевых ресурсов Сибири и Дальнего Востока». Томск: Изд. STT, 2000. С.263-265.