

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Отделение/НОЦ Отделение электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль Высоковольтная техника электроэнергетических систем

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Электроимпульсный пробой и разрушение горных пород и твердых диэлектриков при воздействии разнополярных импульсов напряжения

УДК 621.315.61.015.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6А	Кулякин Артём Николаевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Важов В. Ф.	Д.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Антонова И.С.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дашковский А. Г.	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель Отделения/НОЦ/ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ООП	Юшков А. Ю.	К.Т.Н.		

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<i>Универсальные компетенции</i>	
ОК-1	Способностью к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения
ОК-2	Способностью к письменной и устной коммуникации на государственном языке: умением логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; готовностью к использованию одного из иностранных языков
ОК-3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе
ОК-4	Способностью находить организационно-управленческие решения в нестандартных условиях и в условиях различных мнений и готовностью нести за них ответственность
ОК-5	способностью и готовностью понимать движущие силы и закономерности исторического процесса и определять место человека в историческом процессе, политической организации общества, анализировать политические события и тенденции, ответственно участвовать в политической жизни
ОК-6	способностью в условиях развития науки и изменяющейся социальной практики к переоценке накопленного опыта, анализу своих возможностей, готовностью приобретать новые знания, использовать различные средства и технологии обучения
ОК-7	готовностью к самостоятельной, индивидуальной работе, принятию решений в рамках своей профессиональной компетенции
ОК-8	способностью и готовностью осуществлять свою деятельность в различных сферах общественной жизни с учетом принятых в обществе моральных и правовых норм
ОК-9	способностью и готовностью к соблюдению прав и обязанностей гражданина; к свободному и ответственному поведению
ОК-10	способностью научно анализировать социально значимые проблемы и процессы, готовностью использовать на практике методы гуманитарных, социальных и экономических наук в различных видах профессиональной и социальной деятельности
ОК-11	способностью и готовностью владеть основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, использовать компьютер как средство работы с информацией
ОК-12	способностью и готовностью к практическому анализу логики различного рода рассуждений, к публичным выступлениям, аргументации, ведению дискуссии и полемики
ОК-13	способностью и готовностью понимать и анализировать экономические проблемы и общественные процессы, быть активным субъектом экономической деятельности

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
ОК-14	Способностью самостоятельно, методически правильно использовать методы физического воспитания и укрепления здоровья, готовностью к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
<i>Профессиональные компетенции</i>	
ПК-1	Способность и готовность использовать информационные технологии, в том числе современные средства компьютерной графики, в своей предметной области
ПК-2	Способность демонстрировать базовые знания в области естественнонаучных дисциплин и готовностью использовать основные законы в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования
ПК-3	Готовность выявить естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, и способностью привлечь для их решения соответствующий физико-математический аппарат
ПК-4	Способность и готовность использовать нормативные правовые документы в своей профессиональной деятельности
ПК-5	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от последствий возможных аварий, катастроф, стихийных бедствий
ПК-6	Способность и готовность анализировать научно-техническую информацию, изучать отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования
ПК-7	Способность формировать законченное представление о принятых решениях и полученных результатах в виде отчета с его публикацией (публичной защитой);

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Отделение/НОЦ Отделение электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль Высоковольтная техника электроэнергетических систем

УТВЕРЖДАЮ:

И.О. руководителя ИШЭ

_____ Матвеев А.С.

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6А	Кулякин Артём Николаевич

Тема работы:

Электроимпульсный пробой и разрушение горных пород и твердых диэлектриков при воздействии разнополярных импульсов напряжения

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе (наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу.</p>	<p>Конструирование и проектирование испытательной установки. Основным элементом испытательной установки являются два параллельно включенных ГИН собранных по схеме Аркадьева-Маркса, которые подают импульсы разной полярности на электроды.</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов (аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования,</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор литературы 2. Методика проведения экспериментов 3. Расчет и моделирование основных параметров установки 4. Результаты исследований 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение 6. Социальная ответственность 7. Заключение

<i>конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Демонстрационный материал (презентация в MS Power Point)
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Школа инженерного предпринимательства, Доцент Антонова И.С.
«Социальная ответственность»	Доцент каф. ЭБЖ Дашковский А.Г.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Обзор литературы	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШЭ	Важов В.Ф.	д.т.н., профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6А	Куляеин Артём Николаевич		

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Отделение/НОЦ Отделение электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль Высоковольтная техника электроэнергетических систем

Период выполнения – осенний/весенний семестр 2017/2018 учебного года

Форма представления работы:

магистерская диссертация

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
20.05.2018 г.	Основная часть	60
24.05.2018 г.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
28.05.2018 г.	Социальная ответственность	10
31.05.2018 г.	Обязательное приложение на иностранном языке	15

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Учёная степень	Подпись	Дата
Профессор ИШЭ	Важов Владислав Фёдорович	д.т.н., профессор		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Учёная степень	Подпись	Дата
И.О. руководителя ИШЭ	Матвеев А.С.	к.т.н.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6А	Кулякин Артём Николаевич

Школа	ИШЭ	Отделение	ОЭЭ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<i>1. Описание рабочего места и проверка соответствия</i>	<i>Рабочее место – электротехническая лабораторная аудитория, в которой находится высоковольтная электрогидравлическая установка</i>
<i>2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i>	– <i>Федеральный закон от 21.12.1994 №69-ФЗ « О пожарной безопасности»</i> – <i>Федеральный закон от 24.06.1998 №89-ФЗ "Об отходах производства и потребления"</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды</i>	<i>Вредные факторы производственной среды:</i> – <i>Микроклимат</i> – <i>Производственный шум и вибрация от электроустановки</i> – <i>Освещение лабораторной аудитории</i> – <i>Электромагнитное излучение</i>
<i>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды</i>	– <i>Электробезопасность</i>
<i>3. Охрана окружающей среды</i>	– <i>Утилизация отходов производства и потребления</i>
<i>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</i>	– <i>Пожарная безопасность (пожар в электротехнической лаборатории)</i>
<i>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности</i>	– <i>Служба охраны труда на предприятии</i> – <i>Социальное страхование от несчастных случаев и профзаболеваний</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Дашковский Анатолий Григорьевич	к.т.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6А	Кулякин Артём Николаевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5АМ6А	Кулякин Артём Николаевич

Школа	ИШЭ	Отделение	Электроэнергетических систем
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Электроэнергетика и Электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость материальных ресурсов - по средней стоимости в г.Томске Оклады - в соответствии с окладами сотрудников НИ ТПУ</i>
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Дополнительная заработная плата 13%; Районный коэффициент 1.3.</i>
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Общая система налогообложения (в т.ч. 27,1% - отчисления во внебюджетные фонды по хоздоговорам), ставка дисконтирования 10 %.</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Проведение предпроектного анализа. Определение целевого рынка и проведение его сегментирования. SWOT-анализ.</i>
<i>2. Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НИИ</i>
<i>3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Расчет показателей экономической эффективности</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Календарный план – график проведения НИОКР

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ШИП	Антонова И.С.	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5АМ6А	Кулякин Артём Николаевич		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 117 страниц, 35 рисунков, 25 табл.,
22 источников, 1 приложение.

Ключевые слова: ЭИ эффект, разрушения горной породы, гранит, песчаник, разнополярные импульсы, вода.

Целью работы является исследования электрической прочности внедрения канала разряда в горные породы при одновременном воздействии разнополярных импульсах высокого напряжения. Основным элементом испытательного стенда является система на основе двух параллельно включенных ГИН собранных по схеме Аркадьева-Маркса, которые подают импульсы разной полярности на электроды.

Создана и испытана установка для разрушения горных пород при одновременном воздействии разнополярных импульсов высокого напряжения. Проведено исследование влияния одновременного внедрения разнополярных импульсов в горную пород.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики ГИН были получены в процессе выполнения работы путем расчётов и экспериментальных данных.

Разработанная установка будет использоваться в исследованиях проводимых в ИШЭ для развития ЭИ технологий с точки зрения применения этого эффекта в промышленности:

- нефтегазовой и химической;
- транспортная (железная дорога и метрополитен);
- горная;
- электроэнергетической;
- строительная;

Обозначения и сокращения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

Поляризация диэлектриков: явление, связанное с ограниченным смещением связанных зарядов в диэлектрике или поворотом электрических диполей, обычно под воздействием внешнего электрического поля, иногда под действием других внешних сил или спонтанно;

Разрядная камера: специальное устройство, применяющееся в ЭИ разрушении.

В настоящей работе использованы следующие сокращения:

ЭИ – электроимпульсное;

РК – разрядная камера;

ГИН – генератор импульсного напряжения;

ДИН – делитель импульсного напряжения;

Т – трансформатор;

ТЗ – техническое задание;

ХХ – холостой ход;

КЗ – короткое замыкание;

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	13
1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	19
1.1 Физическая природа поляризационного эффекта	19
1.2 Виды поляризации	21
1.3 Влияния эффекта поляризации и полярности электродов на электрическую прочность диэлектрика.	25
1.4 ЭИ эффект пробоя и разрушения твёрдых диэлектриков	29
1.4.1 Возможности внедрения разряда в твердое тело в жидкости ...	31
1.5 ЭИ эффект пробоя жидких диэлектриков	34
1.5.1 Влияние среды на пробой.	37
1.6 Анализ результата обзора.	41
2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭСПЕРМЕНТОВ	42
2.1 Схема замещения двух параллельно соединённых ГИН	42
2.2 Схема запуска	43
2.3 Схема измерения напряжения	45
2.4 Устройство испытательного стенда	46
2.5 Выбор рабочей жидкости	47
2.6 Выбор и размер образцов	48
2.7 Измерения откольной воронки	49
3. ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА ИСПЫТАНИЯ	50
3.1 Расчет основных элементов схемы ГИН	52
3.2 Расчет шаровых разрядников	54
3.3 Расчет зарядной схемы	55
3.4 Опыты холостого хода и коротко замыкания	57
4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭСПЕРМЕНТОВ.....	60
4.1 Пробой воды	60
4.2 Пробой разрушение песчаника.....	62

4.3 Пробой и разрушения гранита.....	67
4.4 Анализ экспериментальных результатов	75
5. Финансовый менеджмент.....	77
5.1 Введение.....	77
5.2 Предпроектный анализ	77
5.2.1 Потенциальные потребители	77
5.2.2 SWOT-анализ	79
5.2.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации	81
5.2.4 Виды коммерциализации.....	82
5.3 Инициация проекта	83
5.3.1 Цели и результат проекта	83
5.3.2 Организационная структура проекта	83
5.3.3 Ограничения и допущения	84
5.4 Планирование научно-технического проекта	85
5.4.1 Контрольные события проекта	85
5.4.2 План проекта.....	86
5.4.3 Бюджет научного исследования	89
5.4.4 Реестр рисков проекта.....	97
5.5 Определение финансовой, бюджетной, экономической и социальной эффективности исследования	97
5.6 Вывод по разделу	101

ВВЕДЕНИЕ

Развитие горнорудной и нефтегазовой промышленности характеризуется все возрастающими объемами добычи полезных ископаемых, увеличилась доля буровых работ в крепких горных породах. Увеличиваются объемы работ в особо крепких породах для бурения скважин, самых разных назначений, для геолого–разведочных работ, сооружения промышленных объектов и т.д.

На данный момент одним из перспективных способов разрушения горных пород является комбинированное использование электроимпульсного (ЭИ) и механического способов бурения.

ЭИ способ использует для разрушения твердых диэлектрических и полупроводящих материалов энергию разрядного канала при электрическом пробое горной породы. ЭИ способ разрушения был открыт в начале шестидесятых годов в Томском политехническом университете [1].

По сравнению с традиционными способами ЭИ способ разрушения позволяет снизить энергоемкость буровых работ, за счет силы растяжения, которая оказывает разрушающее действие. Энергетическая эффективность разрушения мало зависит от прочности горной породы. Максимальный технико-экономический эффект достигается при разрушении особо крепких горных пород и бурения скважин больших диаметров.

Одним из недостатков ЭИ бурения являются высокие градиенты напряжения, жесткие требования к параметрам импульса, что является сдерживающим фактором для внедрения ЭИ технологии в производство, в частности для применения при бурении скважин.

На данный момент для разрушения (бурения) крепких горных пород, ведется разработка погружных генераторов импульсных напряжений.

Следующим этапом развития технологии бурения является комбинирование электроимпульсного и механического метода бурения. Здесь важна достаточная гибкость в энергии импульса, подаваемого на забой, и возможность справиться с окружающими условиями, присущим глубоким скважинам.

В скважинах глубиной 3-4 км характерно повышенное давление, что сказывается на производительности буровых работ ЭИ способом. В связи с этим возникает вопрос исследования эффективности бурения различных горных пород при повышенных давлениях [2].

Также актуален вопрос определения оптимального межэлектродного расстояния и энергии единичного импульса при ЭИ разрушении горных пород и бурении скважин.

Для реализации ЭИ способа разрушения требуется источник импульсов высокого напряжения с необходимыми временными и энергетическими параметрами. Схемы формирования высоковольтных импульсов для ЭИ технологии должны отвечать двум условиям: в стадии инициирования пробоя необходимо гарантированное получение импульсов напряжения с заданной амплитудой и крутизной фронта, а в канальной стадии требуется обеспечение оптимального режима энерговыклада в канал. Наиболее распространенными являются схемы: емкостный генератор импульсов напряжения по схеме умножения Аркадьева–Маркса и генератор импульсов напряжения с электромагнитной коррекцией формы и амплитуды импульса напряжения. При ЭИ бурении и резании горных пород наибольшее применение нашли генераторы по схеме Аркадьева–Маркса, обладающие простотой конструкции и обслуживания и высокой надежностью работы.

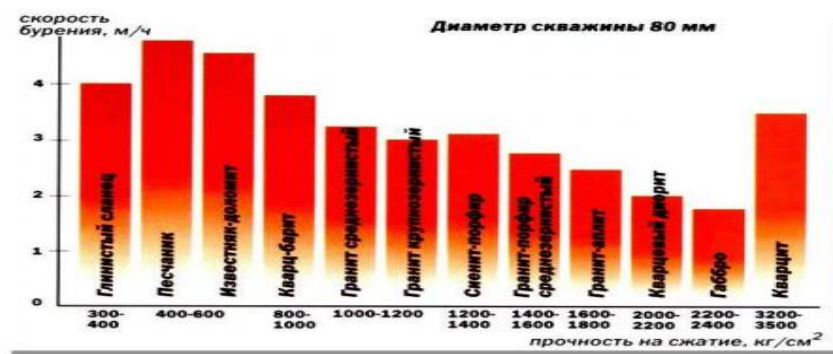


Рисунок 1 – Диаграмма изменения скорости ЭИ бурения от предела прочности горных пород на сжатие (диаметр скважины 80 мм)

Для ЭИ бурения необходимая амплитуда импульсов напряжения составляет $(200-600) \times 10^3$ В, а энергия в импульсе – $(0,1-50) \times 10^3$ Дж. Большинство ГИН по схеме Аркадьева–Маркса были изготовлены для установки их на поверхности, а не в скважине. В этом случае между ГИН и буровым наконечником (нагрузкой) должна быть включена передающая линия – электроимпульсный буровой снаряд (ЭИБС). Практически при этом КПД передачи энергии от накопителя находится в диапазоне $(0,35-0,75)$ [7]. Здесь КПД – отношение энергии, выделенной в канале разряда, к энергии, запасенной ГИН.

В качестве недостатков этой схемы следует отметить ограниченность возможности вариации режимов энерговыклада и глубокоосциллирующий режим разрядной цепи. В полевых условиях ЭИ бурения скважин использовались только ГИН по схеме Аркадьева–Маркса с импульсами косоугольной формы. При этом пробой осуществлялся на фронте импульса напряжения. Как следует из принципа ЭИ разрушения, при ЭИ бурении не требуется вращения бурового наконечника и других механических нагрузок; забою скважины может быть придана любая форма (круглая, квадратная, эллиптическая и др.); площадь забоя может изменяться практически без ограничений; возможно бурение с керном; схемы промывки скважины и выноса шлама не имеют существенных отличий от традиционных схем для механических способов бурения. Износ бурового наконечника незначителен,

что позволяет проходить сотни метров скважины без его замены. Это позволяет изготавливать элементы бурового наконечника из рядовых сталей. На основании накопленного опыта и полученных результатов можно отметить, что ЭИ способ бурения в полной мере отвечает требованиям, сформулированным выше и обладающий следующими преимуществами:

- 1) бездолотное разрушение горной породы;
- 2) импульсное (взрывное) разрушение горной породы;
- 3) разрушение крупным сколом;
- 4) сокращённое число трансформаций энергии;
- 5) эффективное бурение крепких и очень крепких пород - высокая скорость бурения, малые энергозатраты;
- 6) большой диапазон диаметров и форм скважин;
- 7) малый износ бурового наконечника;
- 8) глубина бурения не ограничена (по крайней мере до глубины 3500м);
- 9) возможность бурения с керном;
- 10) мобильность буровой установки;
- 11) широкие возможности по регулированию и автоматизации процесса бурения

Достоинства и недостатки ЭИ Способа бурения

На основании многочисленных исследований и опытов бурения, резания и дробления горных пород и руд проведен подробный анализ преимуществ электроимпульсного способа разрушения перед существующими и разрабатываемыми методами. Приведем лишь наиболее существенные достоинства разрушения твердых тел электрическими разрядами в их толще.

– Способ канализации электрической энергии к электродной системе на забое скважины и её преобразование в энергию поля механических

напряжений, создаваемых электрическим разрядом в горной породе, осуществляется без промежуточных ступеней её преобразования в другие виды энергии, характерных для иных методов воздействия на разрушаемый объект.

- Простота создания больших мощностей на забое скважин.

- Скорость и энергоёмкость бурения определяются, главным образом, упругими и электрофизическими характеристиками твердых диэлектриков, а зависимость от их твердости и абразивных свойств незначительна.

- Износ бурового наконечника незначителен, поскольку рабочим органом, разрушающим породу, является, по существу, электрический разряд в твердом теле. Известно, что около половины затрат при существующих способах бурения приходится на стоимость долота (коронки). При электроимпульсном бурении имеется возможность проходки сотен метров скважин без смены бурового наконечника.

- Разрушение породы происходит под действием динамических усилий растяжения, возникающих при выделении электрической энергии в канале пробоя. Известно, что механическая прочность на растяжение меньше, чем на сжатие, что создает благоприятные условия для повышения эффективности использования энергии, подводимой к забою скважины при электроимпульсном способе бурения

- Возможность получения высоких скоростей и малая энергоёмкость бурения пород высокой крепости. ЭИ способ имеет большие резервы дальнейшего увеличения производительности и снижения стоимости буровых работ, что позволяет существенным образом улучшить его технико-экономические показатели. Основными направлениями в решение этой задачи являются: – Применение дешевых и недефицитных промывочных

жидкостей, обеспечивающих с достаточной степенью вероятности развития пробоя в толще разрушаемого тела.

– Повышения производительности бурения за счет увеличения межэлектродных промежутков, частоты следования импульсов и эффективности разрушения под воздействие каждого импульса путем оптимизации его параметров на всех стадия процесса разряда.

– Обеспечение надежной работы изоляции буровых снарядов и электроимпульсных установок в длительных режимах их работ.

– Совершенствования технологических схем и, главным образом, разработка и выбор технических средств и источников импульсов, обеспечивающих эффективные режимы бурения горных пород.

Решения этих проблем возможно лишь при дальнейшем исследовании физических основ электроимпульсного способа бурения и совершенствовании на этой основе техники и технологии отдельных этапов процесса бурения скважин.

Недостатки ЭИ бурения: высокие градиенты напряжения, жесткие требования параметрам импульса, которые являются сдерживающим фактором для внедрения ЭИ технологии в производство, в частности для бурения скважин.

1. Высокие амплитуды импульсного напряжения затрудняют создание промышленных установок для ЭИ бурения. Необходимо снижение рабочего напряжения.

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

3. Поиск рабочей и промывочной жидкости с целью замены углеводородов (трансформаторного и солярового масел).

4. Поиск наиболее эффективных областей применения ЭИ технологии бурения.

5. Необходимость исследований пробоя и разрушения горных пород при больших расстояниях между электродами (более 50мм) для бурения скважин большого диаметра.

6. Необходимость бурения глубоких скважин требует исследования поведения жидкостей и горных пород при повышенных давлениях и температурах.

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Физическая природа поляризационного эффекта

При помещении диэлектрика в электрическое поле в нем наблюдаются две основные группы явлений. Первая из них характерна только для диэлектриков. Она связана с тем, что внутри диэлектрика, находящегося в электрическом поле, всегда существует отличное от нуля внутреннее электрическое поле. Поэтому разноименные электрические заряды, из которых в конечном итоге построено любое вещество, будут смещены друг относительно друга. Положительные заряды смещены по направлению поля, а отрицательные в противоположном направлении. Смещение может происходить как на микроскопические, так и на макроскопические расстояния в пределах образца. Если же диэлектрик содержит полярные молекулы, то они будут повернуты электрическим полем. Всю эту группу явлений обычно называют диэлектрической поляризацией. [3]

С другой стороны, в реальных диэлектриках небольшое количество зарядов способны не только перемещаться на большие расстояния в электрическом поле, но и разряжаться, доходя до электродов, или переходить

в металлические электроды (входить в диэлектрик). Эта группа явлений называется электропроводностью. Электропроводность в отличие от поляризации не является характерной особенностью диэлектриков. Поэтому часто (особенно при рассмотрении явлений поляризации) ею вообще пренебрегают, считают, что она равна нулю. Такой диэлектрик называют идеальным. Однако в ряде случаев процессы, связанные с электропроводностью диэлектриков, необходимо принимать во внимание, например при рассмотрении диэлектрических потерь.

При смещении зарядов в электрическом поле каждый элемент объема диэлектрика, в пределах которого произошло смещение, приобретает дипольный момент, направленный вдоль внешнего поля. Размеры этих областей — диполей зависят от того расстояния, на которое сместились заряды. Они могут быть весьма различны: от молекулярных размеров (что встречается чаще всего) до макроскопических (в пределе, равном размеру образца). В связи с этим диэлектрик в электрическом поле представляется составленным из отдельных элементарных областей — диполей, ориентированных в одном направлении. Определим поляризацию диэлектриков как состояние вещества, характеризующееся наличием дипольного момента у любого элемента его объема. Заметим, что поляризация может возникать как под действием внешнего электрического поля (и исчезать после удаления поля), так и самопроизвольно (спонтанно). Последнее явление наблюдается только у отдельных видов диэлектриков (пироэлектриков и сегнетоэлектриков).

1.2 Виды поляризации

Все частицы диэлектрика, способные смещаться или ориентироваться под действием внешнего электрического поля, можно отнести к двум видам: упруго связанные (сильно связанные) и слабо связанные.

Процессу смещения упруго связанных частиц препятствует упругая сила. Упруго связанная частица имеет одно положение равновесия, около которого она совершает тепловые колебания. Под действием внешнего электрического поля частица смещается из этого положения равновесия на небольшое расстояние. Это ведет к поляризации. Упругие силы, или лучше сказать квазиупругие, связывают электронную оболочку и ядро в атомах, атомы в молекулах, положительно и отрицательно заряженные ионы в кристаллах, дипольные молекулы в твердых телах.[3]

В отличие от упруго связанных частиц слабо связанные частицы имеют несколько положений равновесия, в которых они в отсутствие внешнего электрического поля могут находиться с определенной вероятностью. Переход из одного положения равновесия в другое осуществляется под действием флуктуации теплового движения. Частица колеблется около положения равновесия, затем через некоторое время скачком меняет это положение равновесия на другое. В новом положении равновесия она также испытывает тепловые колебания до тех пор, пока под действием флуктуации не изменит его. Время ожидания, время колебаний в определенном положении равновесия зависит от того силового поля, в котором находится смещающаяся частица (высоты потенциального барьера между равновесными положениями) и от температуры диэлектрика. Во внешнем электрическом поле энергия частицы в равновесных состояниях изменяется, так что частица занимает их с другой вероятностью, чем в отсутствие поля. В результате положительно заряженные частицы смещаются относительно отрицательно заряженных (как правило, на большие расстояния, чем при

упругом смещении). Появляется асимметрия в распределении заряженных частиц, т. е. поляризация. Основную роль в этом процессе играет тепловое движение. Именно оно направленно перебрасывает частицы в присутствии внешнего электрического поля и возвращает их к хаотическому распределению после удаления поля. Тепловое движение не только «помогает», но и «мешает» (противодействует) смещающимся частицам как можно больше сместиться или повернуться в направлении внешнего поля.

Соответственно с изложенной картиной поляризацию разделяют на упругую и релаксационную (или тепловую).

Существует четыре вида упругой поляризации. Наиболее распространенным видом является электронная упругая поляризация. Время ее установления составляет $10^{-14} - 10^{-15}$ сек.

Следующим видом упругой поляризации является атомная поляризация, частным случаем атомной поляризации является ионная упругая поляризация молекул и кристаллов. Время установления атомной поляризации происходит за время $10^{-11} - 10^{-14}$ сек.

Релаксационная поляризация также разделяется на несколько видов в зависимости от того, какие частицы релаксируют и на какие расстояния. Если слабо связанными релаксирующими частицами являются дипольные молекулы газов, жидкостей или твердых тел, способные ориентироваться под действием внешнего электрического поля, то релаксационная поляризация называется дипольной или ориентационной поляризацией. Если релаксируют слабо связанные ионы, то релаксационная поляризация называется ионной тепловой поляризацией (в отличие от ионной упругой поляризации).



Рисунок 2 – Механизмы поляризации

Слабо связанный ион, в отличие от упруго связанного иона, способен не только совершать тепловые колебания относительно некоторого положения равновесия в кристаллической решетке, но и скачком изменять свое равновесное положение на другие под действием флуктуаций теплового движения. При этом он остается в пределах некоторого микрообъема, который представляет собой глубокую потенциальную яму. Появление слабо связанных ионов (и электронов) обусловлено дефектами кристаллической решетки. Аналогично ионам, слабо связанными частицами могут быть электроны. В этом случае релаксационная поляризация называется электронной тепловой поляризацией (в отличие от электронной упругой поляризации).

Помимо рассмотренных видов релаксационной поляризации, в твердых диэлектриках часто наблюдается еще одна ее разновидность, тесно связанная с электропроводностью. Впервые на возможность поляризации этого типа указал акад. А. Ф. Иоффе. В его работах объемная, или как ее часто называют высоковольтная, поляризация была тщательно исследована. В последствие под термином объемная поляризация стали понимать ряд явлений, сходных между собой в том, что они вызывают поляризацию в диэлектрике за счет образования в нем объемных зарядов. Сущность объемной поляризации состоит в следующем. При движении носителей тока через диэлектрик под действием электрического поля может случиться, что они или не полностью доходят до электродов, или подходят к электродам, но не разряжаются. Тогда в диэлектрике образуются объемные заряды — положительный у катода и отрицательный у анода. Заряды в диэлектрике окажутся смещенными, но не на микрорасстояния, как при обычных видах поляризации, а на макрорасстояния. Причины этих явлений до сих пор еще полностью не выяснены. Поэтому объемную поляризацию можно считать разновидностью релаксационной поляризации. К этому же виду относится поляризация, возникающая в том случае, если диэлектрик содержит макровключения. На поверхностях раздела неоднородностей такого диэлектрика в электрическом поле могут накапливаться объемные заряды и вызывать поляризацию. Поляризация этого вида часто играет существенную роль в электроизоляционной технике, где имеют дело с неоднородными диэлектриками.

1.3 Влияния эффекта поляризации и полярности электродов на электрическую прочность диэлектрика.

В твердых диэлектриках при действии напряжения образуются объемные заряды, искажающие распределение напряжения по образцу. Образование объемных зарядов в диэлектриках, находящихся электрическом поле, называют высоковольтной поляризацией. После отключения источника напряжения на электродах диэлектрика имеется напряжение V_p и при замыкании цепи протекает ток деполяризации, имеющий направление, противоположное току при поляризации.

При низких температурах, когда проводимость диэлектриков преимущественно электронная, преобладают объемные электронные заряды. С повышением температуры, когда проводимость определяется движением положительных зарядов, объемный заряд будет положительным — ионным. Скорость установления и рассасывания объемного заряда определяется электропроводностью образца. Объемный заряд может распределяться по образцу с равномерной плотностью или сосредоточиваться вблизи электродов. Величина объемного заряда Q в диэлектрике характеризуется током деполяризации, напряжением поляризации V_p и поляризационной емкостью $C = \frac{Q}{V_p}$. Напряжение поляризации V_p , частично компенсируя напряжение U , подведенное к электродам, уменьшает среднюю напряженность поля в диэлектрике: $E_{\text{ср}} = \frac{U - V_p}{d}$, что может сопровождаться увеличением измеряемого пробивного напряжения. Если на диэлектрик после его предварительной поляризации воздействовать напряжением обратной полярности, то тогда средняя напряженность поля определится: $E_{\text{ср}} = \frac{U + V_p}{d}$. В этом случае измеряемое пробивное напряжение образца меньше, чем при пробое без предварительной поляризации.[4]

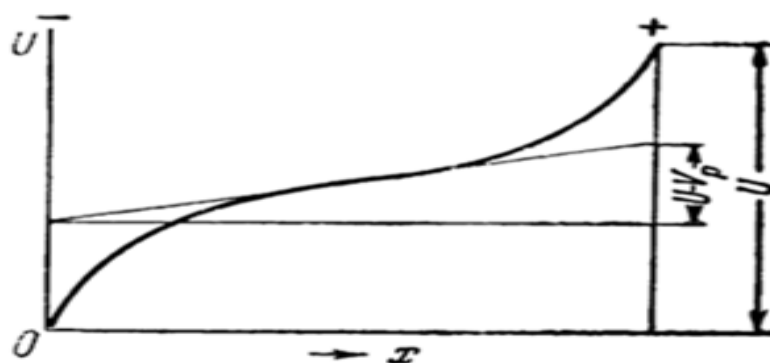


Рисунок 3 – Распределения напряжения в каменной соли.

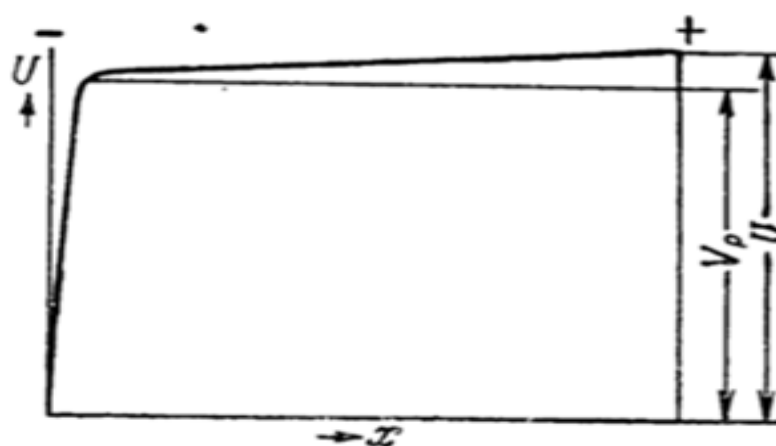


Рисунок 4 – Распределения напряжения в кальците.

Образование объемных зарядов в диэлектрике может понизить его пробивное напряжение; это следует из теории электрического пробоя диэлектриков Фаулера, рассмотревшего схему энергетических уровней электронов при контакте металл — диэлектрик. На рис. 5, а представлена эта схема при отсутствии электрического поля, а на рис. 5, б—при электрическом поле в диэлектрике. В последнем случае электроны получают от внешнего электрического поля дополнительную потенциальную энергию, различную по величине в зависимости от местонахождения электронов. Электроны катода приобретают вероятность перехода из катода в зону

проводимости диэлектрика. На рис. 5, в представлена схема энергетических уровней в случае образования объемных зарядов у обоих электродов.

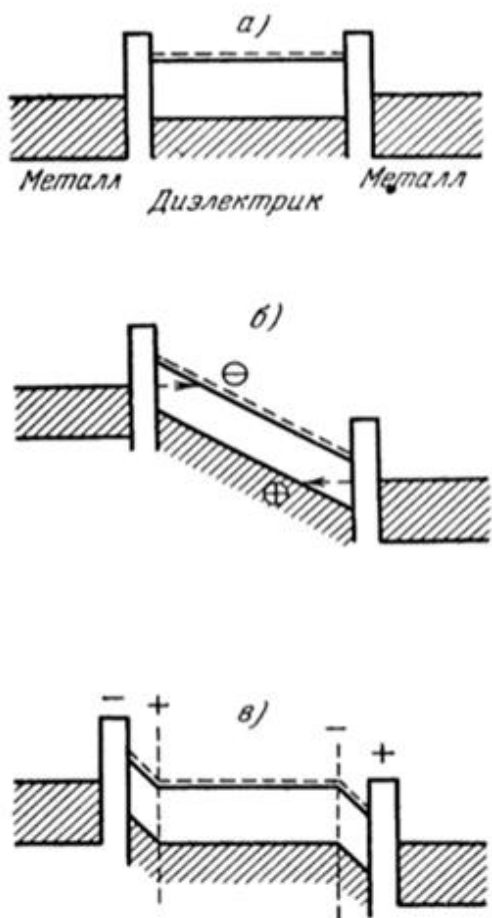


Рисунок 5 – Схема энергетических уровней при контакте металл-диэлектрик.

Образование объемного заряда должно изменить условия вхождения электронов из катода. На рис. 5, в представлен случай, когда условия вхождения электронов в диэлектрик будут облегченными. За счет объемных зарядов понижается пробивное напряжение.

Если при пробое диэлектрика к электродам прикладывается напряжение полярности, обратной той, при которой происходила поляризация, то вхождение электронов из катода в диэлектрик затрудняется, и пробивное напряжение диэлектрика повышается.

А. А. Смуров отметил, что при снятии вольт-амперной характеристики твердого диэлектрика внезапное переключение направления тока сопровождается пробоем диэлектрика.

Если не изменять направление тока, то диэлектрик выдержал бы значительно большее напряжение. Это явление А.А. Смуров связывает с высоковольтной поляризацией.

Грюнвальд исследовал влияние объемного заряда на пробивное напряжение фарфора и других диэлектриков в неоднородном электрическом поле при различных видах напряжения. Он получил более высокое пробивное напряжение при постоянном токе, когда образуются объемные

заряды. Наиболее низкое пробивное напряжение он наблюдал в случае пробоя диэлектриков при импульсном напряжении с одновременным воздействием постоянного напряжения полярности, обратной полярности импульса. Эти результаты Грюнвальд объясняет влиянием высоковольтной поляризации.

Ю.Н. Вершинин в своих работах исходит из того, что за счет малой ширины зоны проводимости в ШГК (щелочно-галогидный кристалл) $2\div 5$ эВ невозможно разогнать электроны в электрическом поле до энергий $10\div 14$ эВ и обеспечить процессы ударной ионизации. При этом он предлагает принципиально другой подход к рассмотрению электрического пробоя твердых диэлектриков, основанный на представлениях о электронно-тепловых и детонационных процессах. Анализируя электронные процессы в приэлектродных областях твердого диэлектрика он пришел к представлениям о первичном канале пробоя, механизм формирования которого связан с развитием двух видов неустойчивости в системе электронов проводимости. Распространение первичных каналов разряда неразрывно связано с возникновением и перемещением в твердом диэлектрике фазовых переходов 1-го рода. При разряде с катода это переход «твердое тело – расплав», а при разряде с анода – «твердое тело – плотная плазма».[5] Ю.Н. Вершининым установлено, что дозвуковые скорости катодного разряда являются следствием специфики свойств реализуемого при этом контакта твердого диэлектрика со своим расплавом. Также показано, что электрический разряд с анода обладает всеми признаками, характерными для явления электронной детонации. На первой предпробивной стадии – до возникновения канала разряда – электронные процессы протекают в пределах твердого состояния вещества диэлектрика – в его зоне проводимости. Носители заряда в этой зоне по происхождению можно подразделить на две группы – собственные и несобственные электроны. В сильных электрических полях первые

проникают в зону проводимости путем электростатической и ударной ионизации примесных уровней, а вторые – за счет инжекции из электрода.

Исходя из выше сказанного можно сделать вывод, что образование объемных зарядов в диэлектрике может как понизить, так и повысить его пробивное напряжение. Это следует из того, что электроны получают от внешнего электрического поля дополнительную потенциальную энергию. Многочисленные исследования показали, что при пробое твердых диэлектриков в системе электродов острие – плоскость, если устранено влияние краевых разрядов, получается более высокое пробивное напряжение при отрицательной полярности электрода-острия.

1.4 ЭИ эффект пробоя и разрушения твёрдых диэлектриков

Сущность электроимпульсного способа состоит в разрушающем действии электрического разряда при пробое твердых тел. Динамическое поле механических напряжений возбуждается ударными волнами, вызванными переменным во времени давлением в канале электрического пробоя. При исследовании электрической прочности твердых и жидких диэлектриков на импульсных напряжениях при временах экспозиции порядка ($10^{-6} - 10^{-7}$) с. скорость нарастания их электрической прочности изменяется по-разному (рис. 6). Снижение электрической прочности твердых диэлектриков по сравнению с жидкими, можно добиться изменением времени воздействия напряжения или увеличением крутизны фронта импульса. По теории Г.А Воробьева одним из основных факторов, влияющих на развитие канала пробоя, является объемный заряд (ОЗ), накапливающийся в жидкости вблизи стержневых электродов по мере осуществления ионизационных и лавинно – стримерных процессов (рис. 7).

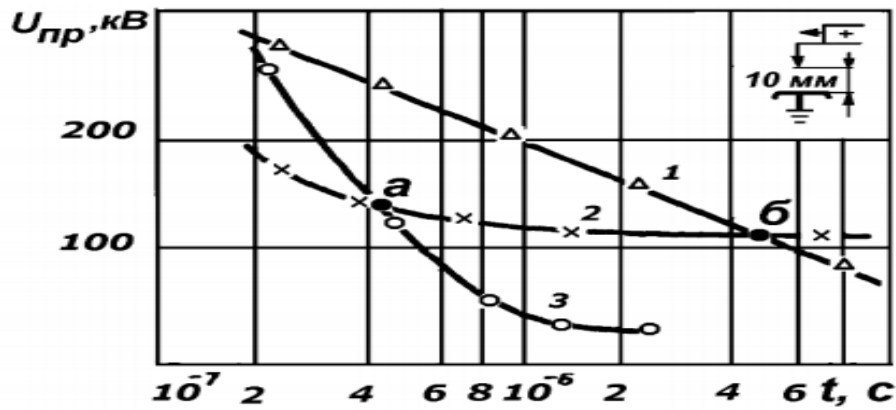


Рисунок 6 – Вольт-секундные характеристики пробоя диэлектриков.

1 - трансформаторное масло, 2 – гранит, 3 – техническая вода.

Объемный заряд в первую очередь приводит к выравниванию электрического поля в жидкости. Процесс этот динамически и в очень значительной степени зависит от напряженности электрического поля на острие и времени воздействия напряжения. Происходит накопление объемного заряда в жидкости, что приводит к уменьшению напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке между границей ОЗ и выравниванию поля в жидкости. В связи с этим дальнейшее продвижение стримерных разрядов вглубь межэлектродного промежутка снижается, а лавинно стримерные процессы происходят между границей ОЗ. и противоположенным электродом.[6] При необходимой величине напряжения (напряженности) на острейном электроде напряженность на головке стирмера оказывается достаточной для зажигания разряда в твердом теле. Таким образом, вблизи острейного электрода возникает зона, занятая ОЗ, в которой разряд в твердое тело не может быть внедрен. Это зона представляет собой эллипс вокруг острейного электрода, большая ось которого направлена в сторону противоположенного электрода. Таким образом, можно предположить, что объёмный заряд в жидкости в близи острейного электрода создает квазиоднородное поле, что препятствует дальнейшему развитию напряженности электрического поля на границе объемного заряда.

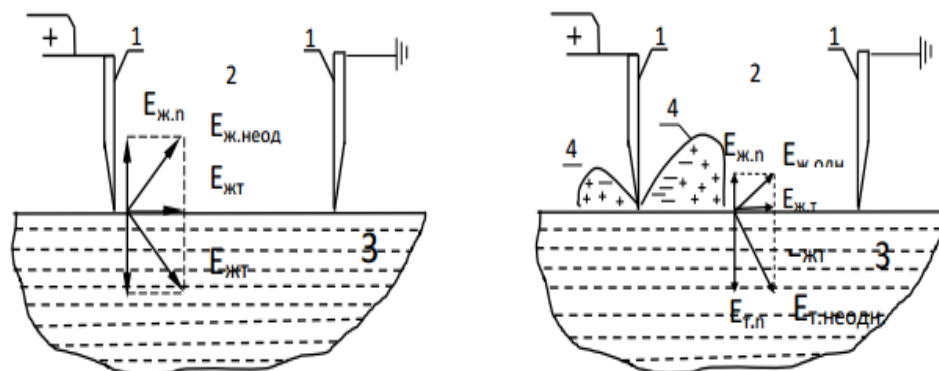


Рисунок 7 – Схематичное распределение напряженности электрического поля в диэлектриках. 1 – электроды; 2 – жидкий диэлектрик; 3 – твердый диэлектрик; 4 – объемный заряд; $E_{т.н.}$, $E_{ж.н.}$ – нормальная; $E_{т.т.}$, $E_{ж.т.}$ – тангенциальная; $E_{т.неодн.}$, $E_{ж.неодн.}$, $E_{ж.одно.}$ – суммарные составляющие напряженности в неоднородных полях в твердых и жидких диэлектриках соответственно; а – до образования ОЗ; б – ОЗ образован.

Пробивное напряжение жидкого диэлектрика в пределе будет соответствовать однородному полю $U_{ж.одн.}$. В твердом диэлектрике поле будет оставаться резконеоднородным и определяется конфигурацией каналов стримерных разрядов по поверхности раздела твердого тела.

1.4.1 Возможности внедрения разряда в твердое тело в жидкости

При подаче импульсного напряжения, с соответствующей крутизной фронта в системе наложенных электродов на поверхность горных пород, находящихся в жидкости (рис. 8), вероятность прохождения разрядного канала в твердом теле будет больше чем 50%.

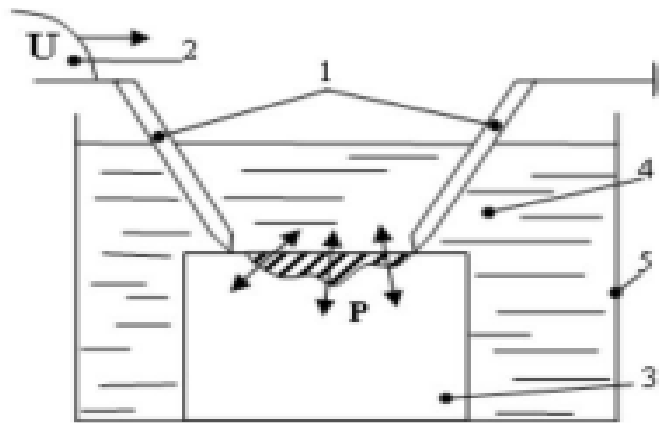


Рисунок 8 – Схема электроимпульсного пробоя твердых тел.

1 – электроды; 2 – импульсное напряжение; 3 – образец; 4 – жидкость
заземленный электрод; 5 – бак;

Для образования откольной воронки необходимо достаточное быстрое выделения необходимой энергии в разрядном канале. При пробое в канале произойдет микро-электровзрыв, что приведет к разрушению горной породы

Из опыта известно, что для твердых диэлектриков пробивные градиенты, по сравнению с жидкими и газообразными диэлектриками, на промышленной частоте и на постоянном токе выше. Поэтому, для того чтобы разрядный канал проходил в твердом диэлектрике, окруженной жидкостью, необходимо сочетание некоторых условий, отдельных явлений и закономерностей.[7]

Для инициирования разряда в твердом диэлектрике необходимо соблюдение параметров импульса, таких как крутизна импульса, длительность воздействия напряжения и амплитуда напряжения.

Так как инструментом разрушения является плазма, износ электродов, изготовленных из обычных сталей чрезвычайно мал и составляет порядка $15,3 \cdot 10^{-6}$ г/имп.

Существует две стадии ЭИ эффекта. Для разработки источников импульсов высокого напряжения и буровых снарядов с надежной изоляцией, прогнозировании эффективных режимов бурения горных пород необходимы сведения о величине, характере и целесообразных границах регулирования параметров нагрузки, создаваемой на объекте разрушения электрическим разрядом.

Разрушение твердых диэлектрических материалов (горных пород) электрическим разрядом в их толще происходит в две стадии .

– Пробивная стадия.

Образования канала пробоя в твердом теле, обусловленное условиями формирования разряда в твердом диэлектрике (стадия формирования разряда).

Параметры импульсов в первой стадии, необходимые при ЭИ бурении для образования с достаточной степенью вероятности канала пробоя в твердом диэлектрике, определяются соотношением электрических прочностей пробиваемой породы, промывочной жидкости и границы их раздела.

– После пробивная стадия

Резкое расширение канала пробоя и разрушение горной породы, вызванное выделением электрической энергии в канале разряда (Завершающая стадия)

Параметры импульсов во второй завершающей стадии определяются сопротивляемостью материала разрушающим усилиям, создаваемым электрическим разрядом в твердом теле. Различие свойств горных пород и промывочной жидкости, влияющих на выбор параметров импульса в различных стадиях разряда, вызывают необходимость исследования по оптимизации параметров нагрузки в каждой стадии отдельно.

1.5 ЭИ эффект пробоя жидких диэлектриков

Жидкие диэлектрики, обладая значительно более высокой электрической прочностью по сравнению с газами, нашли очень широкое применение в качестве высоковольтной изоляции в разнообразных устройствах: трансформаторах, кабелях, передающих линиях, конденсаторах, выключателях, разрядниках и т. д.[8]

Жидкие диэлектрики можно классифицировать по их природе на следующие группы:

- 1) углеводороды минеральные – продукты перегона нефти и каменного угля (трансформаторное, конденсаторное и др. масла);
- 2) углеводороды растительные (касторовое, льняное и другие масла);
- 3) хлорированные углеводороды ароматического ряда (совтол);
- 4) кремнийорганические соединения. Кроме этого, жидкие диэлектрики могут быть полярными и неполярными, в связи с этим у них существенно изменяются свойства, которые приведены в табл. 1

Таблица 1

Свойства диэлектриков			
Вид диэлектрика	ρ , Ом·см	ϵ	$\text{tg}\delta$
Неполярные	$\geq 10^{18}$	1,8...2,5	$\approx 0,001$
Слабополярные	$\approx 10^{11} \dots 10^{12}$	$> 2,5$	$\approx 0,01$
Сильнополярные	$\approx 10^7 \dots 10^8$	> 5	$\approx 0,1$

В промышленности имеют дело с технически чистыми жидкими диэлектриками, у которых влияние посторонних примесей ограничено некоторой минимальной концентрацией. В этой связи в теориях пробоя технически чистых жидкостей рассматривают влияние посторонних примесей, неизбежно появляющихся при эксплуатации. Важнейшие посторонние примеси в жидких диэлектриках:

- а) вода;
- б) газы;
- в) волокна целлюлозы;
- г) углерод;
- д) продукты разложения используемого жидкого диэлектрика.

По сравнению с воздухом (газом) пробивные напряжения масла имеют очень большой разброс. Отклонение от среднего составляет 50% и более, а среднеквадратичное отклонение 10...15%.

Определение электрической прочности масла $U_{пр}$ по ГОСТ 6581-75 осуществляется в стандартном пробойнике на переменном напряжении.

На пробой жидких диэлектриков существенное влияние оказывает множество факторов, которые могут, как понижать пробивное напряжение (загрязнения, увлажнение и др.), так и увеличивать его (очистка, давление, барьеры и т.д.). Основные факторы, изменяющие $U_{пр}$:

1) загрязнение и увлажнение (увеличение загрязненности масла снижает $U_{пр}$, ничтожное количество влаги ($< 0,03\%$) резко снижает $U_{пр}$);

2) вязкость (уменьшение вязкости уменьшает $U_{пр}$);

3) температура (с увеличением температуры $U_{пр}$ уменьшается; на импульсном напряжении это влияние незначительное; для технически чистого масла зависимость $U_{пр} = f(T^{\circ}C)$ носит сложный характер);

4) давление (для технически чистого масла увеличение давления приводит к увеличению $U_{пр}$, т.к. увеличивается давление в газовых пузырьках);

5) наличие барьеров (барьеры могут существенно повысить $U_{пр}$, особенно в резко неоднородном поле;

6) время действия напряжения (с увеличением времени воздействия напряжения $U_{пр}$ уменьшается; чем чище диэлектрик, тем меньше это

влияние; на импульсном напряжении коэффициент импульса в несколько раз больше, чем для газовых диэлектриков);

7) форма, площадь электродов и расстояние между ними (форма электродов создает поля разной степени неоднородности при $S = \text{const}$, чем больше коэффициент неоднородности, тем ниже $U_{\text{пр}}$; с увеличением площади электродов $U_{\text{пр}}$ уменьшается; увеличение расстояния увеличивает $U_{\text{пр}}$);

8) полярность электродов при несимметричной их форме (при отрицательной полярности пробивные напряжения больше, чем при положительной; этот эффект тем больше, чем более полярен диэлектрик).

Пробой жидких диэлектриков — явление сложное, что объясняется сложным составом жидких диэлектриков и многими факторами, влияющими на развитие пробоя (загрязнение, форма, размеры и материал электродов, температура, давление и др.) Для хорошо очищенных жидкостей величина электрической прочности достигает 1000 кВ/см.

Геометрическая форма электродов создает поля разной степени неоднородности, и чем больше коэффициент неоднородности, тем ниже пробивное напряжение. Даже незначительное увеличение радиуса кривизны электродов в резко неоднородных полях дает более существенное увеличение $U_{\text{пр}}$ по сравнению с воздухом. Увеличение расстояния между электродами S приводит к увеличению пробивного напряжения (рис. 9).

На величину пробивного напряжения при неизменном S оказывает влияние площадь электродов и объем жидкости между электродами: увеличение площади электродов и объема жидкости вызывает снижение $U_{\text{пр}}$. Состояние поверхности электродов также оказывает влияние на электрическую прочность $E_{\text{пр}}$ жидких диэлектриков. Загрязнение, окисление и плохая полировка поверхности электродов снижают $E_{\text{пр}}$. По мере увеличения расстояния между электродами влияние материала электродов

уменьшается и при расстоянии несколько миллиметров практически прекращается.

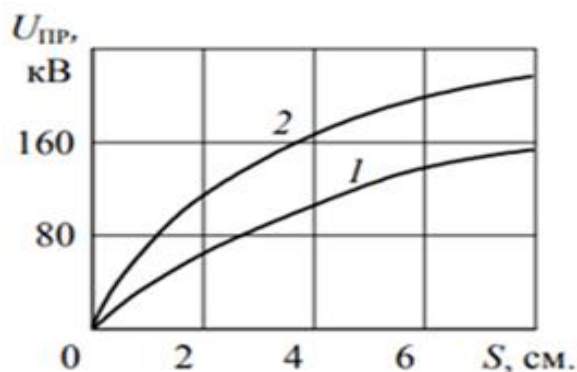


Рисунок 9 – Зависимость пробивного напряжения от расстояния между электродами и полярности для трансформаторного масла, электроды острое – плоскость: 1 – положительная полярность; 2 – отрицательная полярность: напряжение постоянное.

Влияние материала электродов на $E_{пр}$ жидких диэлектриков осуществляется через эмиссию электронов с катода.

Как следует из рис. 9, пробивное напряжение зависит от полярности электрода-острия при несимметричной системе электродов. Наиболее ярко эта зависимость проявляется для полярных жидкостей. Например, для воды увеличение $U_{пр}$ при отрицательной полярности острия достигает 2,0-2,5 раз по сравнению с положительной полярностью.

1.5.1 Влияние среды на пробой.

Напряжение, при котором появляются разряды в среде у краев электродов, определяются электрической прочностью среды и распределением поля между электродами. Распределение поля зависит от формы и взаимного положения электродов, а также от электропроводности и диэлектрического коэффициента среды и твердого диэлектрика. В отдельных

случаях соотношение этих факторов складывается так, что напряжение с увеличением неоднородности поля не становятся сколь угодно малыми, а приближаются к некоторым минимальным значениям, ниже которых не опускаются, этих минимальных пробивных напряжений оказывается недостаточным, чтобы вызвать появление разрядов в среде.

Если подымать напряжение выше минимального, то соответственно будет повышаться часть напряжения, приходящаяся на среду, и как только в каком-либо месте произойдет пробой среды, то за ним немедленно последует также и пробой твердого диэлектрика. Варьируя форму электродов и среду, можно при данной толщине диэлектрика получить разные значения пробивного напряжения, более или менее превышающее минимальное, вплоть до пробивных напряжений, соответствующих однородному полю. В последнем случае место пробоя расположено под электродом, в то время как при пробое, вызванном разрядами, место пробоя обычно находится у края электрода. [9]

Если в зависимости от толщины диэлектрика максимальные пробивные напряжения, соответствующие однородному полю, даются прямой А, а минимальные кривой В (рис. 10), то значения между ординатами А и В дают для данной толщины диэлектрика те величины пробивных напряжений, какие можно получить, изменяя форму электродов и соотношение диэлектрических характеристик образца и среды, в которой пробой образца происходит. При импульсах напряженность поля распределяется обратно пропорционально диэлектрическим коэффициентам среды и диэлектрика. Чем выше диэлектрический коэффициент среды, тем меньше напряженность поля в ней. Проводимости при распределении поля никакой заметной роли не играют в виду исключительной кратковременности воздействия напряжения; оказывают малое влияния также имеющиеся в среде примеси, например взвешенные частицы и т. п., не успевающие переместиться в поле.

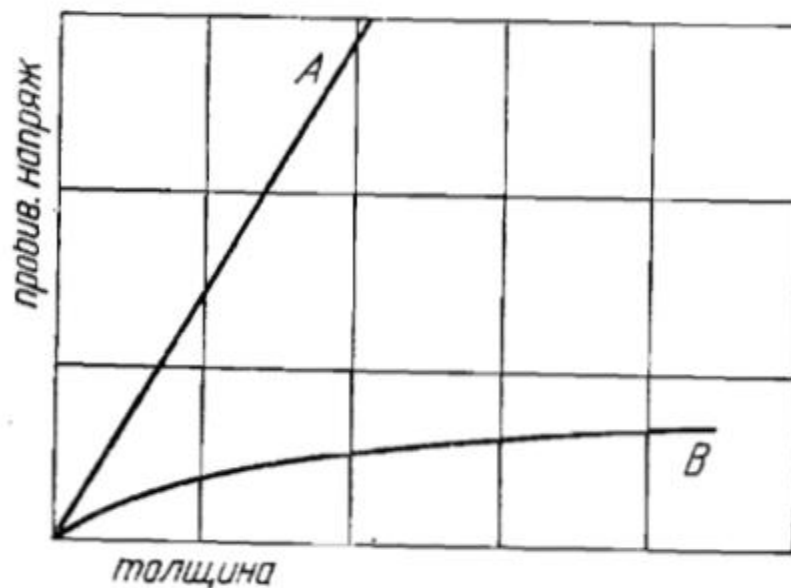


Рисунок 10 – Зависимость пробивного напряжения от толщины диэлектрика.

А – максимальное пробивное напряжения, В – минимальное пробивное напряжения.

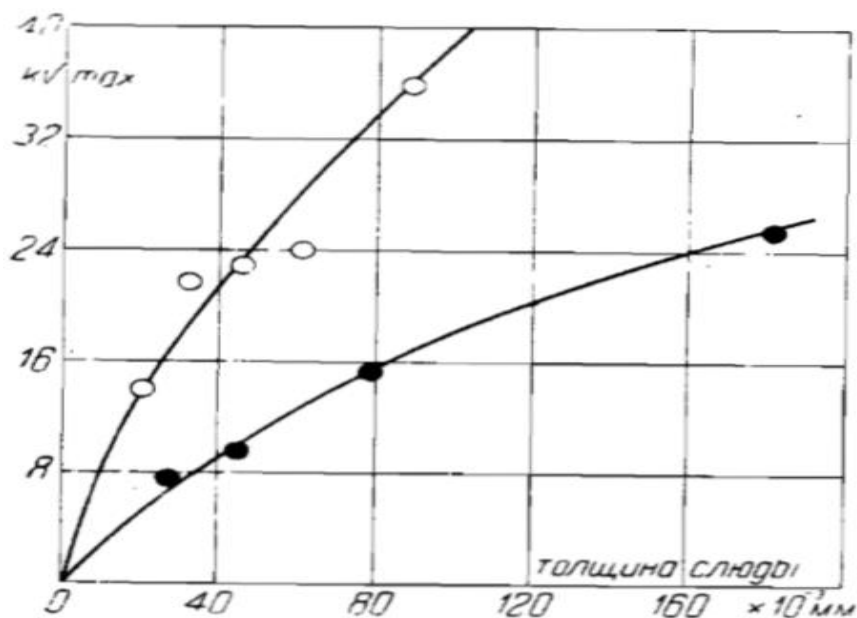


Рисунок 11 – Зависимость пробивного напряжения от толщины для слюды при переменном напряжении.

○ – Среда с большим ϵ , ● – Среда трансформаторное масло

Так как диэлектрический коэффициент является довольно стабильной характеристикой материала, а при данной форме электродов распределение поля определяется исключительно соотношением диэлектрических коэффициентов, то на переменных напряжениях и импульсах легче всего проследить влияния среды на пробой диэлектрика, ниже приведены зависимости.

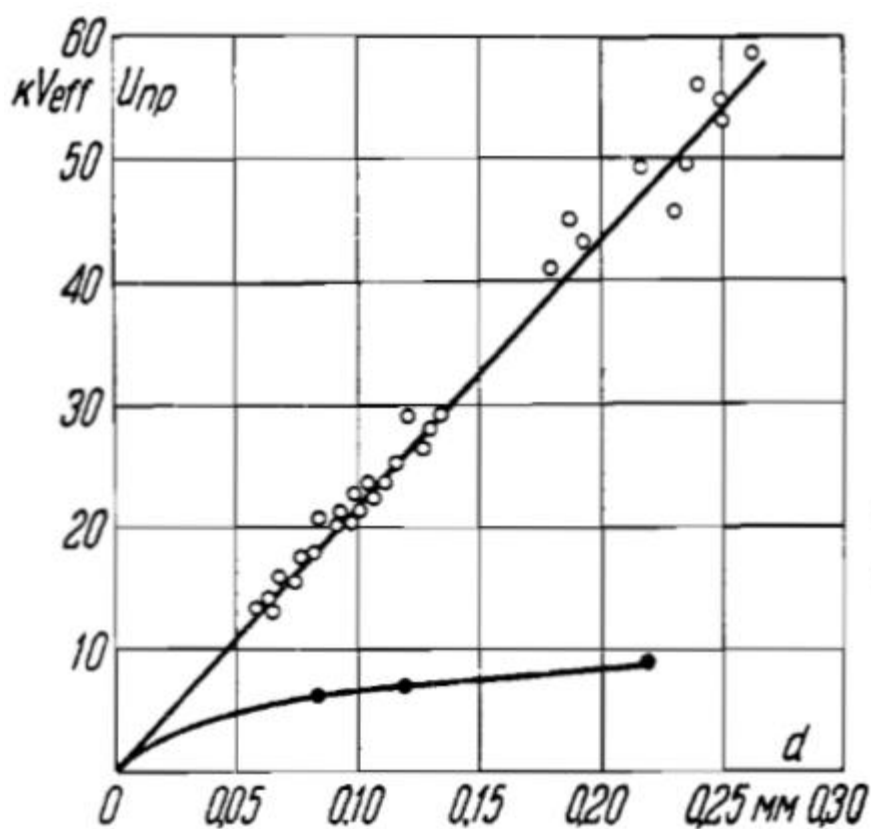


Рисунок 12 – Зависимость пробивного напряжения от толщины для стекла при переменном напряжении.

○ – Полупроводящая среда, ● – Среда трансформаторное масло

1.6 Анализ результата обзора.

ЭИ эффект пробоя является хорошей методом для разрушения горных пород, так как имеет ряд преимуществ над другими видами разрушений.

Исходя из анализа поляризационного эффекта, можно сделать вывод, что он является неотъемлемой частью пробоя диэлектрика. Электрическая прочность диэлектрика зависит от поляризации, а точнее от образование объемных зарядов в диэлектрике которые могут приводит как к понижению пробивного напряжения, так и к его увеличению. Пробой жидких и твёрдых диэлектриков зависит от полярности электрода: более высокое пробивное напряжение при отрицательной полярности электрода-острия.

Описание стадии ЭИ разрушения твердых диэлектрических материалов (горных пород) показывает, что пробой диэлектрика осуществляется в жидкой среде. Различие свойств среды влияет на выбор параметров импульса в первой стадии разряда и вызывают необходимость исследования влияния одновременного воздействия разнополярных импульсов высокого напряжения на горную породу.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭСПЕРИМЕНТОВ

2.1 Схема замещения двух параллельно соединённых ГИН

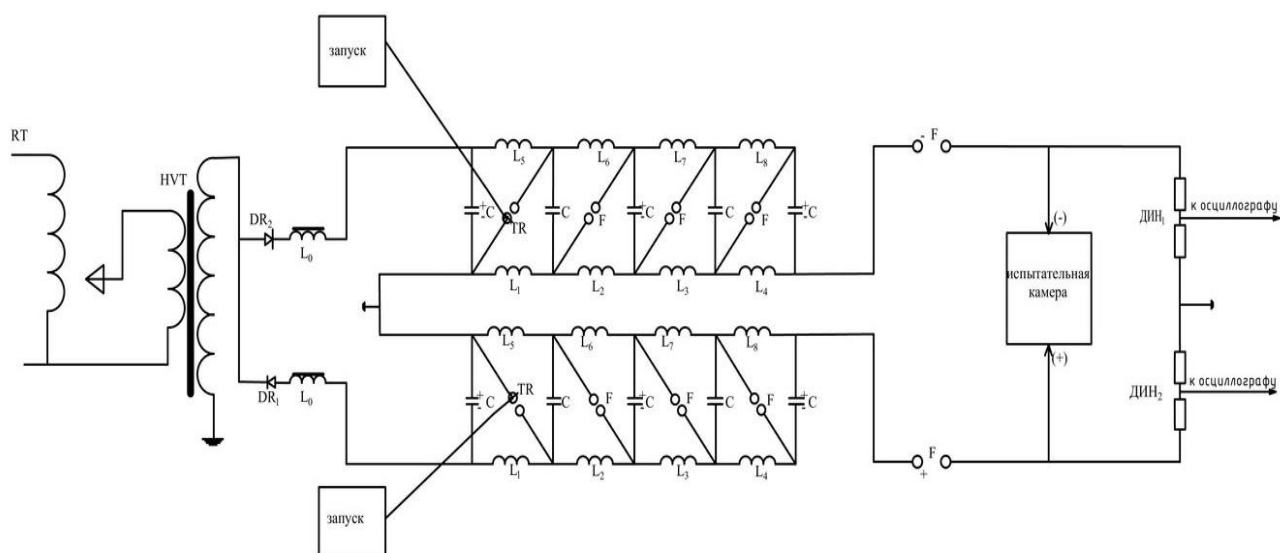


Рисунок 13 – Схема замещения 2 ГИН,

RT – регулировочный трансформатор; HVT – высоковольтный трансформатор; L_0 – зарядные дроссели; DR1, DR2 – выпрямители; C – емкость; L_1 – L_8 – индуктивности; TR – Тригатрон; F – искровой промежутки; ДИН1, ДИН2 – делители напряжения

ГИН собран по схеме Маркса и имеет платформенную конструкцию. В ГИН используется односторонняя зарядка, зарядное напряжения достигает ± 18 кВ. Конденсаторы заряжаются через дроссели L_0 и индуктивности $L_1 - L_8$. Шаровые разрядники диаметром 60 мм изготовлены из нержавеющей стали, расположены в стеклопластиковой трубке диаметром 190 мм и длиной 1,5 м. Расстояние между шарами регулируется до 50 мм. Импульсное напряжения измеряется омическим делителем.

2.2 Схема запуска

Синхронность работы осуществляется с помощью тригatrona и двух блоков запуска для каждого ГИН соответственно.

Тригatron представляет собой трёхэлектродный электронный прибор, два из электродов которого рабочие, предназначены для включения в

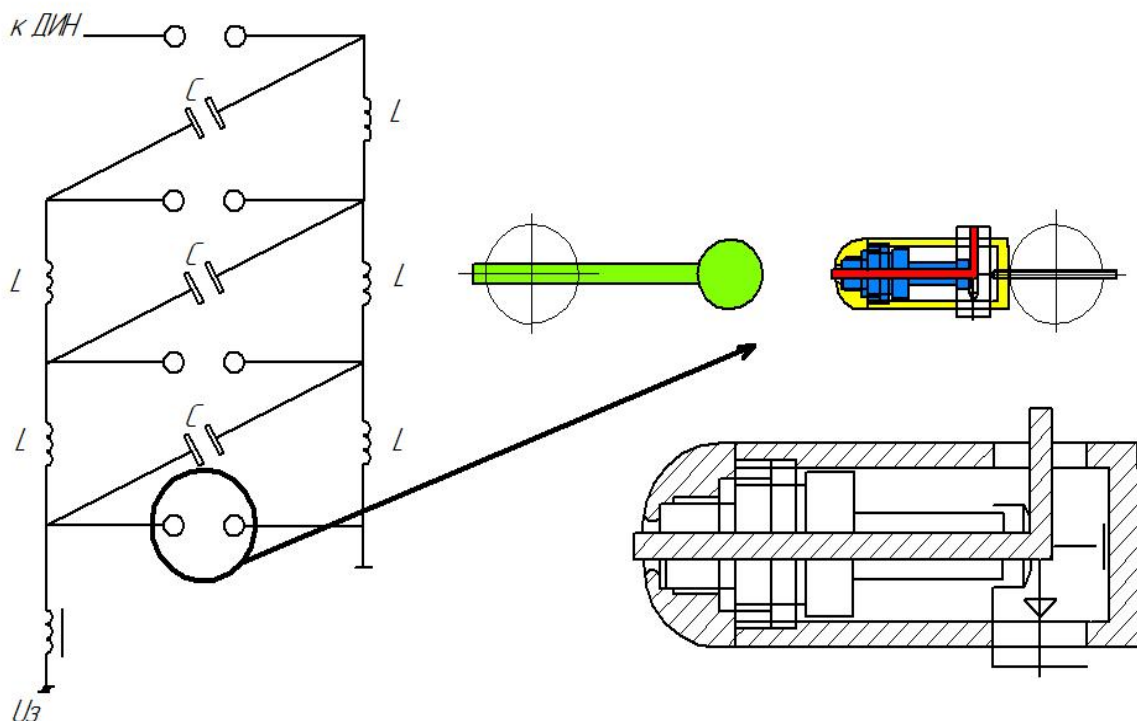


Рисунок 14 – Схема запуска тригatrona

коммутируемую мощную цепь и третий электрод - иницирующий (иногда называемый поджигающим) служит для включения прибора. Перед включением между рабочими электродами приложено высокое напряжение, но ток через прибор не протекает, так как разделены жидким или газообразным диэлектриком. При включении прибора на управляющий электрод подаётся импульс высокого напряжения, ионизирующий газ или другой диэлектрик в пространстве между рабочими электродами. Начальная ионизация межэлектродного промежутка вызывает лавинное размножение зарядов в межэлектродной плазме, при этом электрическое сопротивление между рабочими электродами падает на много порядков, коммутируя внешнюю электрическую цепь. Восстановление прибора из состояния проводимости в непроводящее состояние происходит после снижения тока ниже некоторого малого тока, называемого током гашения. Таким образом, этот прибор не может быть выключен после включения подачей управления на управляющий электрод, а только снижением тока через него.

2.3 Схема измерения напряжения

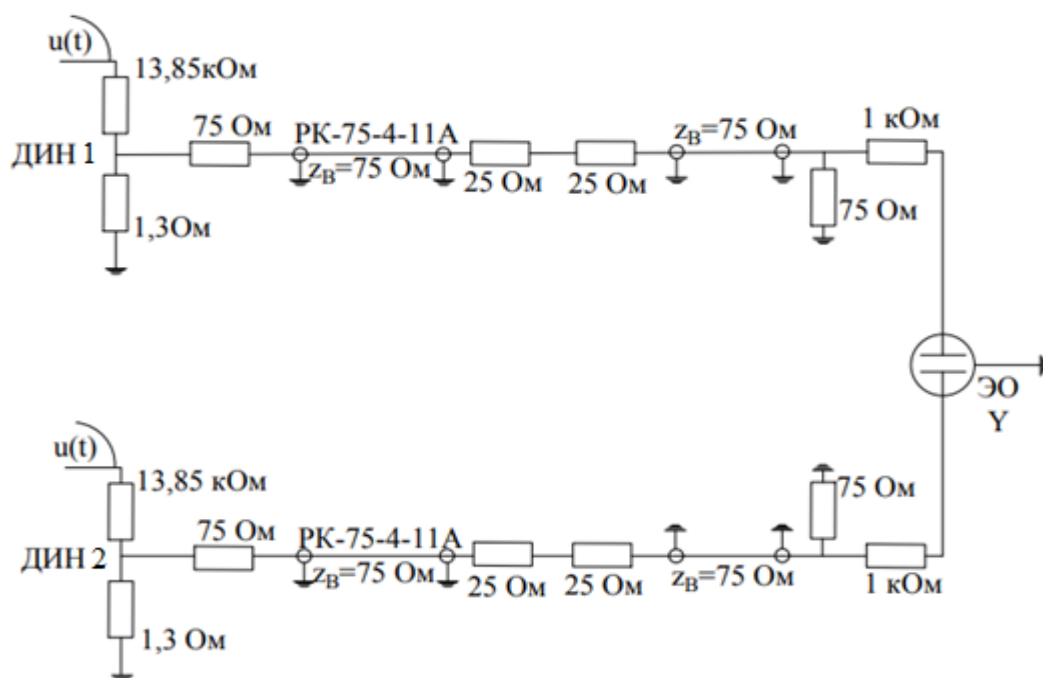


Рисунок 15 – Схема для регистрации импульсов напряжения

Импульсы напряжений, подаваемые на вход осциллографа, преобразовывались до приемлемого уровня с помощью омического делителя напряжения ДИН. Конструктивно ДИН представляет собой изоляционную полиэтиленовую трубку с наружным диаметром 90 мм, высотой 1200 мм. Высоковольтное плечо ДИН сопротивлением 19,8 кОм выполнено нихромовым проводом диаметром 2 мм, уложенным бифилярно. Низковольтное плечо сопротивлением 19,8 Ом выполнено из трёх параллельно соединённых композиционных малоиндуктивных резисторов типа ТВО – 0,25 – Вт – 3,9 Ом. Сигнал поступает от ДИН1 и ДИН2 по информационному кабелю с волновым сопротивлением 75 Ом и далее подаётся на вход осциллографа. Осциллография напряжения, производилась при использовании цифрового запоминающего осциллографа Tektronix TDS - 3032В. Временные и амплитудные развертки позволяли с достаточным разрешением и точностью проследить ход зависимостей напряжения от

времени, в предпробивной и канальной стадиях. Точность измерения осциллограмм с учётом делителя была не более 10%.

2.4 Устройство испытательного стенда

Была спроектирована и изготовлена испытательная камера для проведения экспериментов по определению электрической прочности горных пород в нормальных условиях, при подаче разнополярных импульсов. Камера выполнена в виде цилиндра с толщиной стенки 40 мм.

Объём камеры 40 л;

Система электродов «стержень – стержень»;

Рабочие напряжение: 300 кВ;

Регулируемый межэлектродный промежуток

Подвод высокого напряжения осуществляется с помощью кабелей КПВ 300. Испытательный образец устанавливается на выносную ячейку изготовленную из дельта древесины. Пробой осуществляется с помощью 2 загнутых под углом 45 градусов электродов, на каждый из которых подаются импульсы разной полярности. Электроды выполнены так, чтобы пробой происходил в заданной нами точке.

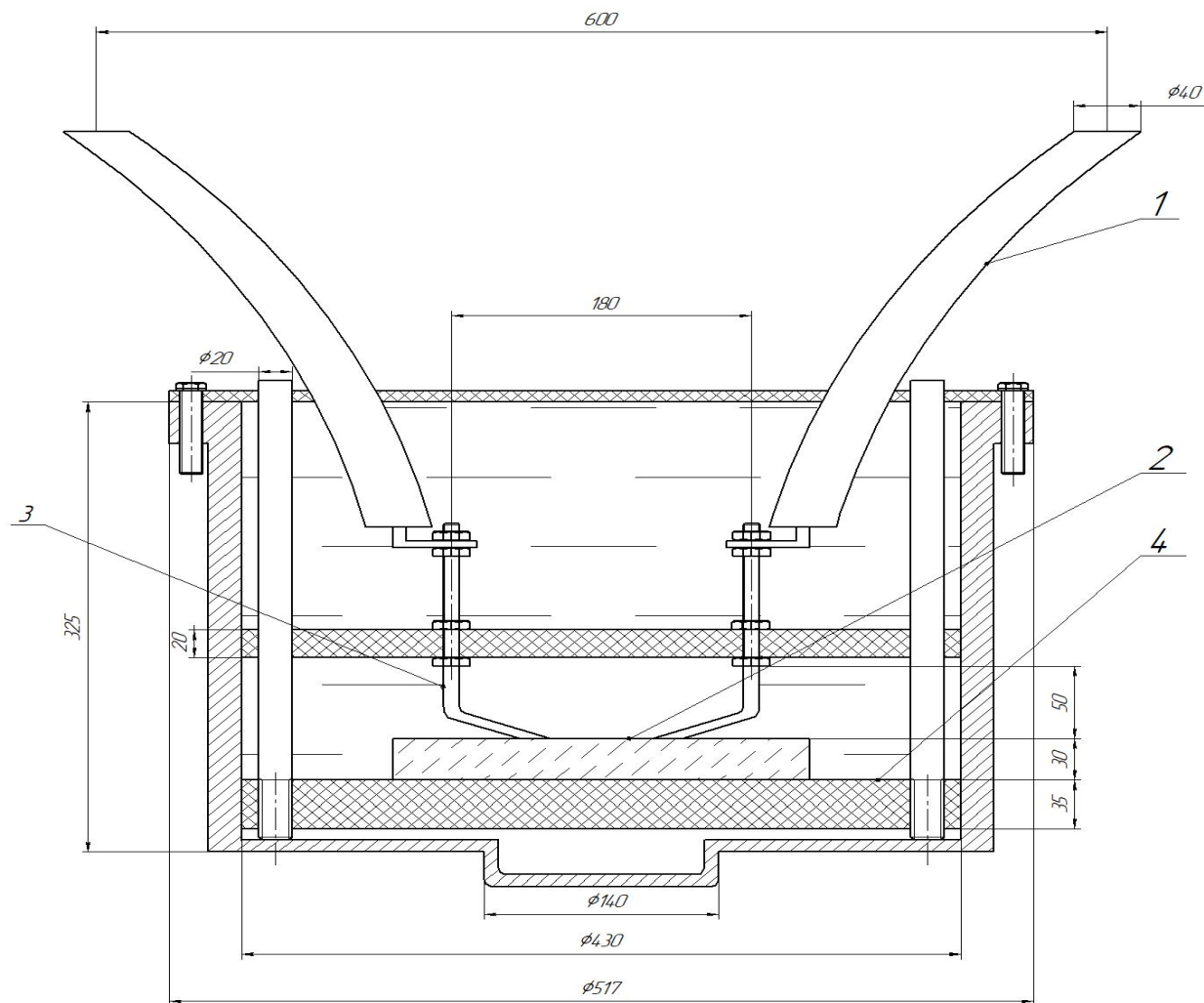


Рисунок 16 – Эскиз разрядной камеры,

1 – кабель КПВ 300, 2 – испытательный образец, 3 – электроды, 4 – ячейка установки образца

2.5 Выбор рабочей жидкости

В качестве рабочей жидкости была выбрана водопроводная вода, как самая распространённая и дешёвая жидкость. Для измерения сопротивления жидкости использовался портативный кондуктометр ЕС-400 точность $\pm 2\%$.

Перед каждым экспериментом по пробою горных пород образец выдерживался в камере некоторое время для пропитки, таким образом с учётом подготовки к испытанию время между каждым экспериментом составляла 15 – 20 минут. В каждом эксперименте подавалась в зависимости от условий до 5 импульсов, что обусловлено большей

производительностью разрушения на импульс. Во время проведения опытов по пробою и внедрения в серии импульсов между импульсами производилась выдержка 30 ÷ 60 секунд.



Рисунок 17 – Портативный кондуктометр EC-400

2.6 Выбор и размер образцов

Были изготовлены образцы горных пород для проведения экспериментов по определению электрической прочности, форма образцов плоская, толщина образцов от 30 мм и более, что больше глубины внедрения канала разряда. В работе использовались образцы гранита, который состоит из кварца, плагиоклаза, калиевого полевого шпата и обладает плотностью —

2600 кг/м³, прочность на сжатие до 300 МПа. А также образцы песчаника плотностью 2250—2670 кг/м³.



Рисунок 18 – Образец гранита после пробоя



Рисунок 19 – Образец песчаника после пробоя

2.7 Измерения откольной воронки

После снятия высокого напряжения и выемки образца осуществлялась промывка осмотр и фотографирование образца. В опытах по внедрению измерялись параметры полученной откольной воронки: максимальная длина, ширина и глубина, а также фиксировался объем разрушения. Измерение откольной воронки производилась с помощью штангенциркуля и

медицинского шприца. Штангенциркулем измерялась длина, ширина и максимальная глубина откольной воронки с точностью 0,5 мм. Объем разрушения измерялся с помощью медицинского шприца с погрешностью 0,05 мл.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА ИСПЫТАНИЯ

Влияние на глубину разрушения гранита различных факторов (расстояния между электродами, количества импульсов, энергозаклада) неизбежно будет изменять объем разрушения — объем откольной воронки. Существенное влияние на объем разрушения должны оказывать физические характеристики различных горных пород. Рассматриваемый в данной работе гранит — гетерогенная горная порода, что вызывает большой разброс показателей разрушения, и при современном уровне знаний о закономерностях пробоя и разрушения они еще не могут аналитически с приемлемой точностью прогнозироваться без экспериментального опробования. На рис. 20 приведены зависимости пробивного напряжения от расстояния между электродами при времени до пробоя $t \sim 0.2-0.35 \mu\text{s}$ для разного числа воздействующих импульсов с 3 до 15 при неизменном расположении электродов. Увеличение числа воздействующих импульсов практически не влияет на величину пробивного напряжения.[10] Зададимся расстоянием между электродами 30 мм, выбор такого расстояния обоснован тем, что мы хотим получить примерное напряжения ГИН равное 300 кВ. Анализируя зависимость максимального пробивного напряжения от расстояния между электродами кривая 1 рисунка 20, пробивное напряжения 300 кВ будет при расстояний между электродами 30 мм.

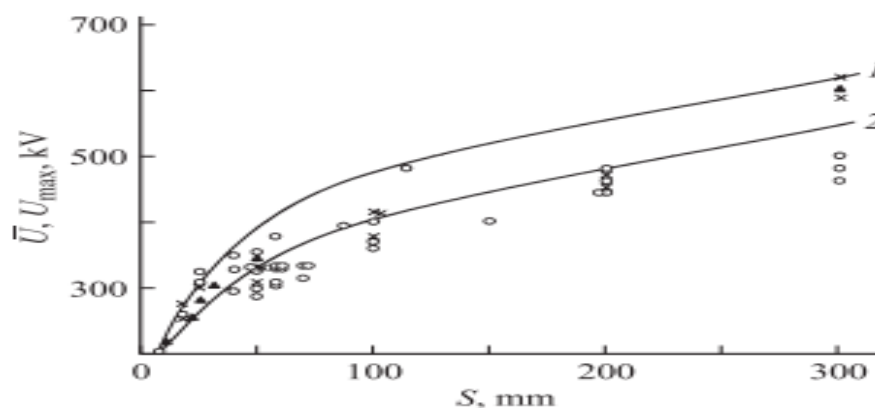


Рисунок 20 – Зависимость пробивного напряжения от расстояния между электродами для разного числа импульсов. точки — эксперимент: \circ – $n = 3$, \times – 6, \triangle – 15. Кривые – расчет: 1 – U_{\max} , 2 – U .

На рис. 21 приведены зависимости производительности (кривая 1) и удельных энергозатрат (кривая 2) от энергии, запасенной генератором импульсов, для $S = 60$ mm при $n = 3$, что адекватно изменению энерговклада. Увеличение W вызывает непрерывное повышение производительности, особенно быстрое в области относительно малых W . При этом удельные энергозатраты изменяются с минимумом в области $W = 650\text{--}900$ J. Если оптимизировать процесс разрушения по удельным энергозатратам, то приведенное значение W будет оптимальным, а оптимальный энерговклад для $S = 60$ mm составит $M = 10.8\text{--}15.0$ J/mm.

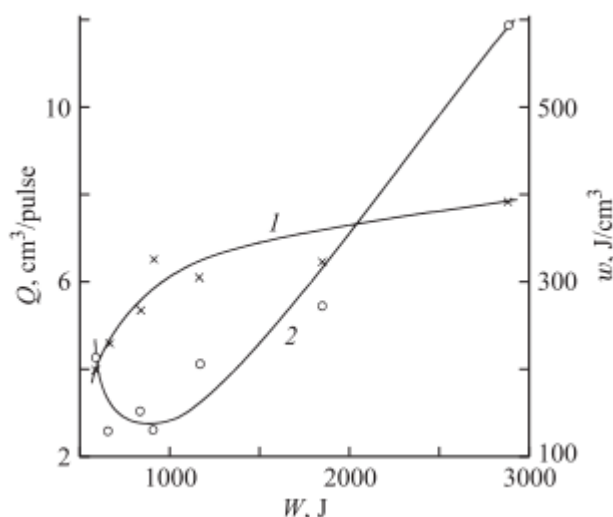


Рисунок 21 – Зависимость производительности разрушения и удельных энергозатрат от энергии генератора: 1 — $Q = f(W)$; 2 — $w = f(W)$.

Энергия накопленная в ГИН, может быть рассчитана с помощью формулы:

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

где S – расстояния между электродами

$$W_p = 90 \cdot S^{1,6} = 90 \cdot 3^{1,6} = 521 \text{ Дж}$$

Данный результат округлим и получим 500 Дж, энергия одного ГИН будет 250 Дж.

Имея энергию и напряжения ГИН, можем найти его ёмкость:

$$C = \frac{2 \cdot W}{U^2} = \frac{2 \cdot 250}{(150 \cdot 10^3)^2} = 0,02 \text{ мкФ}, \quad (2)$$

где: U -напряжения ГИН(150 кВ), W -накопленная энергия ГИН.

В результате расчета:

- рабочее напряжение $U = 150 \text{ кВ}$;
- ёмкость $C_1 = 0,02 \text{ мкФ}$.

3.1 Расчет основных элементов схемы ГИН

Основными параметрами генератора являются:

- число ступеней ГИН N ;
- емкость конденсатора C_K ;

Для расчета нам необходима сумма ёмкости объекта C_2 , которую можно посчитать используя формулу

$$C_2 = [\varepsilon \cdot S / (4 \cdot \pi \cdot d)] \cdot 1,11, \quad (3)$$

ε – диэлектрической проницаемостью (вода),

S – площадь электрода,

d – расстояние между электродами,

$$C_2 = \frac{\varepsilon \cdot S}{4 \cdot \pi \cdot d} \cdot 1,11 = \frac{81 \cdot 3,925}{4 \cdot 3,14 \cdot 3} \cdot 1,11 = 8,44 \text{ пФ}$$

Определим минимальное число ступеней ГИН, обеспечивающих $U = 150$.

Исходным уравнением для расчета является:

$$U_{2\max} = K \cdot N \cdot \eta_v \cdot \eta_{cx} \cdot U_3, \quad (4)$$

U_3 – зарядное напряжение ГИН, примем равное 50 кВ для примерного расчёта.

N – число ступеней ГИН,

$K=1$ – коэффициент, учитывающий снижение напряжения на конденсаторах по мере удаления от первой ступени ГИН.

η_{cx} – коэффициент схемы, для предварительных расчетов принимаем усредненное значение, равное 0,847

η_v – коэффициент использования волны.

Для стандартных параметров импульса $\tau_{\phi} / \tau_{и} = 0.5/20$ мкс коэффициент использования волны $\eta_v = 0,968$

Определяем минимальное число ступеней ГИН:

$$N = \frac{150}{1 \cdot \eta_{cx} \cdot \eta_v \cdot 50} = \frac{150}{1 \cdot 0.847 \cdot 0.968 \cdot 50} = 4,65$$

Т.к. число ступеней не может быть дробным, округляем его до целого большего значения, т.е. принимаем $N=5$.

Тогда необходимая емкость конденсатора (ступени):

$$C_{ст} = C_1 \cdot N = 0,02 \cdot 10^{-6} \cdot 4 = 0,1 \text{ мкФ}. \quad (5)$$

Для построения генератора применим изготавливаемые на заводе конденсаторы ИК-200-0,1 емкостью 0,1 мкФ, основные параметры приведены ниже в таблице.

Таблица 2. Параметры конденсатора ИК-200-0,1

Напряжение, кВ	Емкость, мкФ	Габариты (ДхШхВ), мм	Индуктивность, нГн	Масса, кг
70	0,1	160x160x300	300	11

Разрядная емкость для выбранного типа конденсатора:

$$C_1 = C_{ст}/N = 0,1/5 = 0,02 \text{ мкФ} \quad (6)$$



Рисунок 22 – Эскиз конденсатора ИК-200-0,1

Конденсаторы эксплуатируются на половину рабочего напряжения для увеличения срока службы.

3.2 Расчет шаровых разрядников

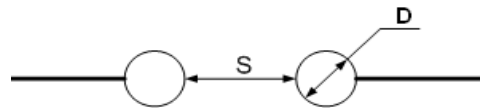


Рисунок 23 – Схема расположения и размеров шаров разрядника

Выбираем расстояние между шарами:

- На первой ступени:

$$S_1 = U_0/E_{проб} = 50/30 = 1,67 \text{ см}, \quad (7)$$

где $E_{проб} = 30 \text{ кВ/см}$ (критическая напряжённость поля воздушного промежутка при нормальных условиях).

- На второй ступени: $S_2 = S_1 + \Delta S$,

где $\Delta S \leq S_1/10 = 0,167 \text{ см}$, принимаем $S_2 = 1,837 \text{ см}$

- На третьей ступени: $S_3 = 1,05 * S_2 = 1,929 \text{ см}$.

- На четвёртой ступени: $S_4=1,05*S_2= 1,929\text{см}$

Выбираем диаметр шаров:

$$D_1 = 5 \text{ см } (d \geq 2S_3);$$

Диаметр шаров остальных ступеней может быть равен диаметру шаров третьей ступени, т.е. $D_{1+15} = 5 \text{ см}$.

3.3 Расчет зарядной схемы

Задаёмся временем заряда генератора $t_{\text{зар}} = 60 \text{ сек}$. Определим величину защитного сопротивления R_3 .

$$R_{\text{защ}} = \frac{t_{\text{зар}}}{15 \cdot N \cdot C_k} = \frac{60}{15 \cdot 5 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}} = 8 \cdot 10^6 \text{ Ом} \quad (8)$$

Определим значение зарядного тока:

$$I_3 = \frac{U_3}{R_3} = \frac{15 \cdot 10^3}{8 \cdot 10^6} = 0,002 \text{ А} \quad (9)$$

Расчетная мощность зарядного устройства:

$$S_{\text{гр}} = \frac{N \cdot C_k \cdot U_{\text{зар}}^2}{t_{\text{зар}}} = \frac{5 \cdot (15 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}}{60} = 1,875 \text{ ВА} \quad (10)$$

В качестве зарядного источника используется высоковольтное выпрямительное устройство типа ВТМ-20/50. С рабочей частотой 50 Гц и естественным охлаждением масла. Может эксплуатироваться в интервале температур от минус 45 до плюс 40 °С



Рисунок 24– Зарядное устройство

Таблица 3. Параметры АВ-50/70.

Тип	Габариты, мм	$U_{вн}$, кВ	$U_{нн}$, кВ	Номинальная мощность, кВА	I_{max} , мА
ВТМ-20/50	165x235x390	380	0,5	24	37

Достоинством зарядного устройства являются: наиболее полное использование трансформатора, малые пульсации выходного напряжения, низкие обратные напряжения для вентиляей.

3.4 Опыты холостого хода и коротко замыкания

После конструирования генератора, выполняется следующий важный этап, который заключается в проведение опытов холостого хода и коротко замыкания. Перечисленные выше опыты необходимы для определения параметров генератора.

Зная число ступеней ГИН и ёмкость конденсаторов, можем найти ёмкость генератора:

$$C_{\text{гин}} = \frac{C_{\text{к}}}{N} = \frac{0,1}{5} = 0,02 \cdot 10^{-6} \text{Ф}, \quad (11)$$

где N – число ступеней ГИН,

$C_{\text{к}}$ – ёмкость конденсатора

Из опыта ХХ можно найти следующие величины: паразитная емкость генератора $C_{\text{п}}$ и максимальное значение напряжения на холостом ходу $U_{\text{хх}}$.

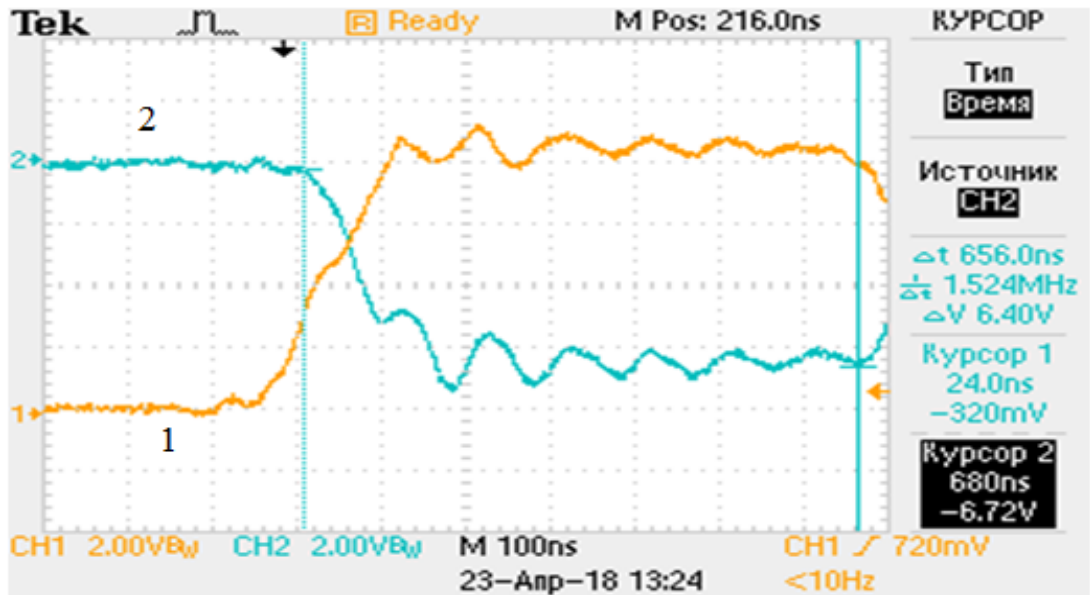


Рисунок 25 – Опыт холостого хода,

1– положительная полярность, 2– отрицательная полярность

Эквивалентную паразитную емкость генератора определяется из периода холостого хода:

$$T_{xx} = 2\pi\sqrt{L_K \cdot C_{\Pi}}, \quad (12)$$

где T_{xx} – периода холостого хода, с;

L_K – индуктивность разрядного контура, Гн;

C_{Π} – эквивалентную паразитную емкость генератора, Ф.

$$C_{\Pi} = \frac{T_{xx}^2}{(2 \cdot \pi)^2 \cdot L_K}$$

$$C_{\Pi 1} = \frac{(5 \cdot 10^{-8})^2}{39,44 \cdot 0,64 \cdot 10^{-6}} = 1 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}$$

$$C_{\Pi 2} = \frac{(100 \cdot 10^{-9})^2}{39,44 \cdot 0,76 \cdot 10^{-6}} = 0,33 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}$$

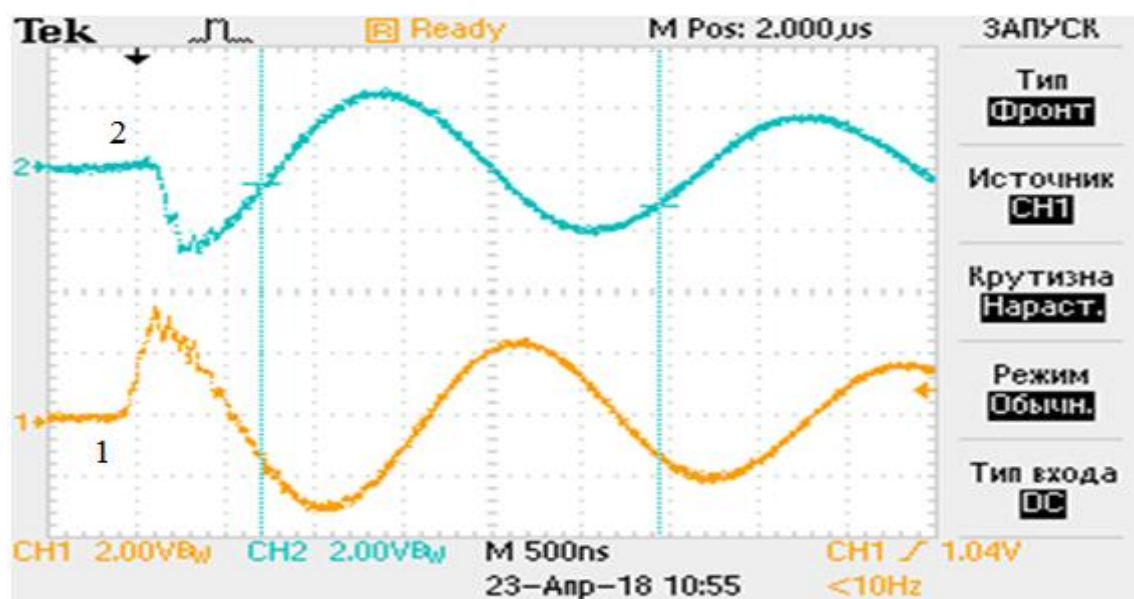


Рисунок 26 – Опыт коротко замыкания,

1– положительная полярность, 2– отрицательная полярность

Исходя из опыта КЗ с помощью осциллограммы можно определить такие величины, как индуктивность разрядного контура L_K и максимальное значение тока I_{K3} .

$$T_{K3} = 2\pi\sqrt{L_K \cdot C_{\text{гин}}}, \quad (13)$$

где $T_{кз}$ – периода короткого замыкания, с;

L_k – индуктивность разрядного контура, Гн;

$C_{гин}$ – ёмкость генератора, мкФ;

$$L_k = \frac{T_{кз}^2}{(2 \cdot \pi)^2 \cdot C_{гин}}$$

$$L_{к1} = \frac{(2,25 \cdot 10^{-6})^2}{39,44 \cdot 0,02 \cdot 10^{-6}} = 0,64 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$$

$$L_{к2} = \frac{(2,45 \cdot 10^{-6})^2}{39,44 \cdot 0,02 \cdot 10^{-6}} = 0,76 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$$

Волновое сопротивление генератора Z находится по следующей формуле:

$$Z = 2 \cdot \sqrt{\frac{L_k}{C_{гин}}}, \quad (14)$$

где L_k – индуктивность разрядного контура, Гн;

$C_{гин}$ – ёмкость генератора, мкФ;

$$Z_1 = 2 \cdot \sqrt{\frac{L_{к1}}{C_{гин}}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,64 \cdot 10^{-6}}{0,02 \cdot 10^{-6}}} = 11,3 \text{ Ом}$$

$$Z_2 = 2 \cdot \sqrt{\frac{L_{к2}}{C_{гин}}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,76 \cdot 10^{-6}}{0,02 \cdot 10^{-6}}} = 12,3 \text{ Ом}$$

Зная зарядное напряжения и число ступеней, найдём напряжения ГИН:

$$U_{гин} = U_{зар} \cdot N, \quad (15)$$

где N – число ступеней ГИН,

$U_{\text{зар}}$ – зарядное напряжения

$$U_{\text{гин1}} = U_{\text{зар1}} \cdot N = 27,5 \cdot 5 = 137 \text{ кВ}$$

$$U_{\text{гин2}} = U_{\text{зар2}} \cdot N = 32,8 \cdot 5 = 163 \text{ кВ}$$

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭСПЕРМЕНТОВ

Исследование процессов разрушение горных пород в лабораторных условиях двухэлектродной системой, наложенных на одну поверхность образца, позволяет понять особенность этих процессов в зависимости от изменения условий разрушения. Полученные результаты способствует разработки устройств для ЭИ бурение горных пород.

В данной работе в первые проведены эксперименты по разрушению образцов гранита и песчаника при одновременном воздействие высокого импульсного напряжения разной полярности. Для этого разработаны два ГИН напряжением до 300 кВ и устройства их синхронизации на базе тригатронных разрядников, а также система одновременного измерения импульсов напряжения положительный и отрицательный полярности и тока при пробой образцов. Пробой образцов осуществляется в технической воде с удельным сопротивлением $\rho = 4,2 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, как наиболее востребованной заказчиком жидкости.

4.1 Пробой воды

Для пробоя и разрушения горных пород нами выбраны расстояния между электродами $S = 20$ и $S = 30$ мм, как широко используемые в работах других учёных. Предварительные опыты по пробую воды в системе двух стержневых электродов как в главе 3, показали отсутствия пробоя для этих расстояний при напряжениях заданных ГИН, что говорит о высокой

электрической прочности воды. Поэтому эксперименты с водой проведены при расстоянии $S = 15$ мм. В таблице 4 приведены результаты пробоя воды. Даже при этом расстоянии пробой происходит.

Таблица 4. Пробой воды при расстоянии $S = 15$ мм

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$U_{пр}^+ / U_{пр}^-$
$t_{пр}^+$, мкс	–	–	–	–	0,672	0,756	0,864	0,800	0,773	1,33
$t_{пр}^-$, мкс	–	–	–	–	0,732	0,728	0,848	0,848	0,787	
$U_{пр}^+$, кВ	161,5	153,5	171	155	170	195	189	170	170,8	
$U_{пр}^-$, кВ	147	122	138	114	131	128	127	119	128	
$U_{пр\Sigma}$, кВ	308,5	275,5	309	269	301	323	316	289	298,8	

При среднем времени до пробоя для обеих полярностей $t_{пр} = 0,773 - 0,787$ мкс, то есть на спаде (хвосте) импульсное напряжение, что судя по вольт-секундной характеристики воды [11], существенно снижает пробивное напряжение по сравнению с пробоем на фронте наших импульсов ($t_{ф} = 0,2$ мкс). Осциллограмма пробоя приведена на рисунке 27.

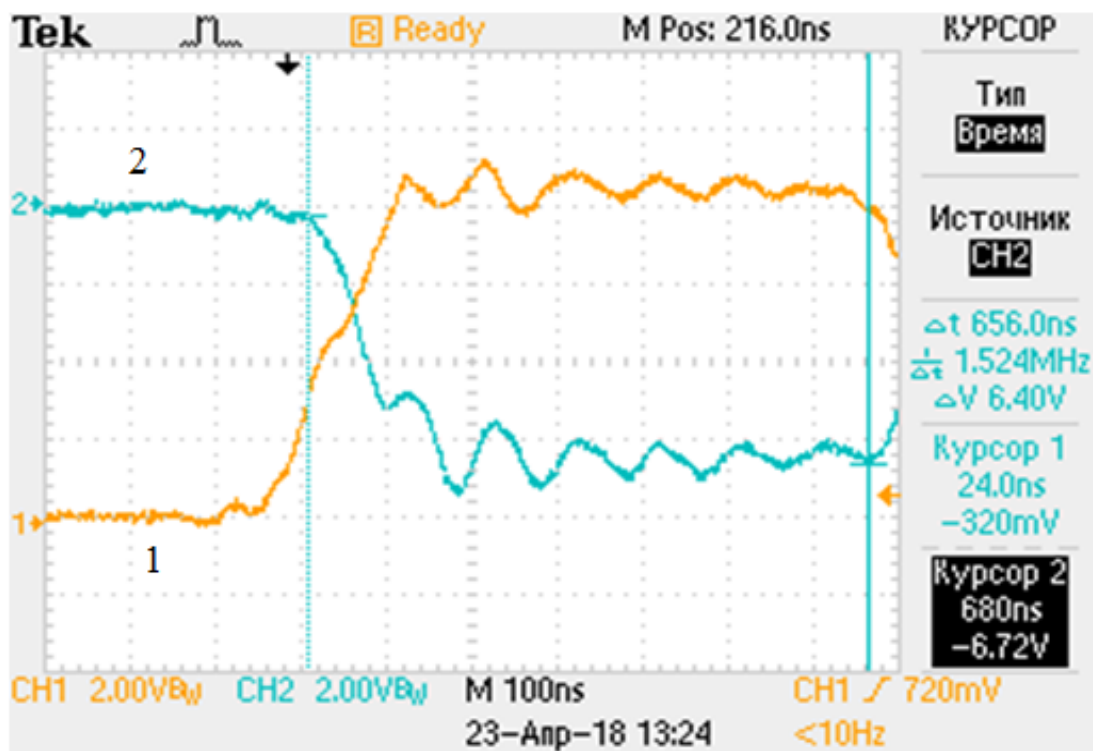


Рисунок 27 – Осциллограмма пробоя воды,

1– положительная полярность, 2– отрицательная полярность

Тем не менее, суммарное среднее напряжение двух разнополярных импульсов составляет 299 кВ т.е. соответствует заданному для ГИН. Неожиданным оказались пробивные напряжения для разных полярностей: на положительной полярности больше чем на отрицательной в

$$\frac{U_{\text{пр}}^+}{U_{\text{пр}}^-} = 1,33 \text{ раза.}$$

4.2 Пробой разрушение песчаника

Песчаник – осадочная горная порода широко распространённая в природе. Нами для экспериментов выбран песчаник томского региона с прочностью 80 МПа и коэффициентом прочности 8 по шкале М.М. Протоdjяконова, т.е. порода средней крепости.[12] Испытания производились при воздействии одного импульса, поскольку при большем

числе импульсов образцы разрушались и невозможно было измерить параметры лунки разрушения. Испытано 7 образцов, при расстоянии между электродами $S = 20$. Результаты испытаний приведены в таблице 5 и на рисунке 28.

Таблица 5. Характеристики пробоя и разрушения песчаника при расстоянии $S = 20$ мм

№	1	2	3	4	5	6	7	Среднее	$U_{пр}^+ / U_{пр}^-$
$t_{пр}^+$, мкс	0,2	0,176	0,252	0,208	0,208	0,272	0,260	0,225	1,15
$t_{пр}^-$, мкс	0,150	0,104	0,136	0,148	0,244	0,292	0,164	0,178	
$U_{пр}^+$, кВ	106	87	87	102	165	162	93,5	100	
$U_{пр}^-$, кВ	74,5	77,5	80,5	74,3	111	108	83,7	87	
$U_{пр\Sigma}$, кВ	180	164	167	176	276	270	177	202	
h, мм	5	2,5	4,4	3,1	5	5,7	5,5	4,65	
Q, см ³ /имп	1	0,1	0,3	–	1,3	1,4	1,2	0,9	

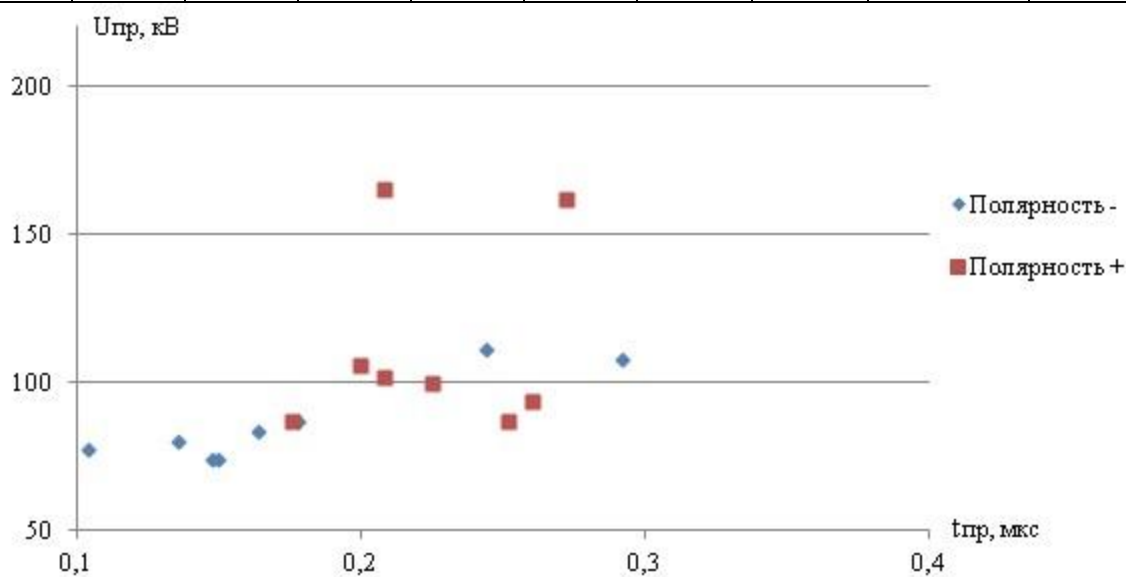


Рисунок 28 – Вольт – временная характеристика пробоя песчаника в воде при расстоянии $S = 20$ мм

Характер распределения пробивных напряжений и время до пробоя показывает большую дисперсию этих величин. Главное, что как и для воды, пробивные напряжения на положительной полярности больше, чем на отрицательной и время до пробоя тоже больше, так как пробой происходит на фронте импульса рисунок 29. Превышение пробивного напряжения на положительной полярности составляет $U_{пр}^+ / U_{пр}^- = 1,15$ раза.

Среднее суммарное пробивное напряжения составляет 202 кВ, что существенно меньше расчётного для $S = 20$ мм [11] (см. табл. 6). Большой интерес представляет определения производительности разрушения Q и параметров каверны разрушения: l – длина, b – ширина, h – глубина, V – объём. Отдельный интерес вызывает глубина разрушения, которая зависит от глубины внедрения канала разряда в образец, т.е. от распределения силовых линий электрического поля в объёме образца. Из литературных источников известно, что для $S = 20$ мм она составляет около $(0,2S - 0,3S)$, но глубина разрушения может быть больше [1,11]. Кроме этого глубина внедрения зависит от материала образца.

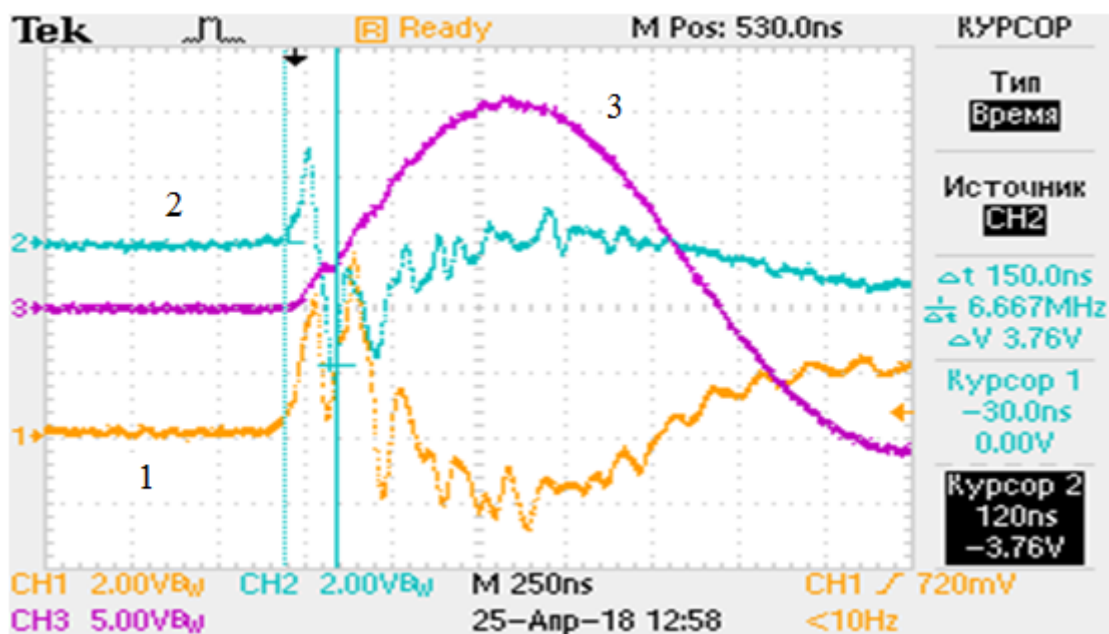


Рисунок 29 – Осциллограмма пробоя песчаника,

1– положительная полярность, 2– отрицательная полярность, 3 – ток

Из таблицы видно, что средняя глубина распределение составляет 0,23S, но имеет место большая дисперсия глубин. Тем не менее, h близка к указанной в литературе. В таблице 6 приведена расчётная глубина разрушения $h = 0,329$, которая естественно больше глубины внедрения канала разряда в горную породу. Следовательно глубина разрушения, полученная нами экспериментально, меньше расчётного значения. Длина и ширина каверны подвержены очень большой дисперсии при малом статистическом количестве образцов нами не рассчитывался. Наиболее информативной величиной производительности разрушение является объем каверны V . Средний объем разрушения составляет $V = 0,9 \text{ см}^2/\text{мм}$. Сравнения с литературными данными по разрушению песчаника, показывает, что это величина существенно больше в 2,1 раза. По-видимому, это определяется недостаточным статистическим объёмом испытаний. Тем не менее, можно констатировать, что объём разрушения песчаника разнополярными импульсами не хуже, чем однополярным.

Подобные эксперименты были проведены для $S = 30$ мм. Было испытано 5 образцов большего размера, чем для $S = 20$ мм и при каждом опыте подано по 2 импульса без смены положения электродов. В таблице 6 и на рисунке 30 даны результаты экспериментов.

Таблица 6. Характеристики пробоя и разрушения песчаника при расстоянии $S = 30$ мм

№	1	2	3	4	5	Среднее	$U_{пр}^+ / U_{пр}^-$
$t_{пр}^+$, мкс	0,284; 0,280	0,304	0,320; 0,332	0,260; 0,250	0,250; 0,240	0,280	1,23
$t_{пр}^-$, мкс	0,324; 0,340	0,256	0,244; 0,268	0,280; 0,280	0,290; 0,270	0,283	
$U_{пр}^+$, кВ	136,5; 141	83,6	136,5; 115,5	102,5; 99,5	102,5; 111	112; 117	
$U_{пр}^-$, кВ	66,5; 83,8	135	105; 119	83,6; 79	77,5; 85	93; 92	
$U_{пр\Sigma}$, кВ	203; 225	218	241; 234	186; 178	180; 196	209	
h, мм	5,5	4,5	9	4,5	5	5,019	
Q, см ³ /имп	0,8	0,7	1,25	Откол	0,9	0,91	

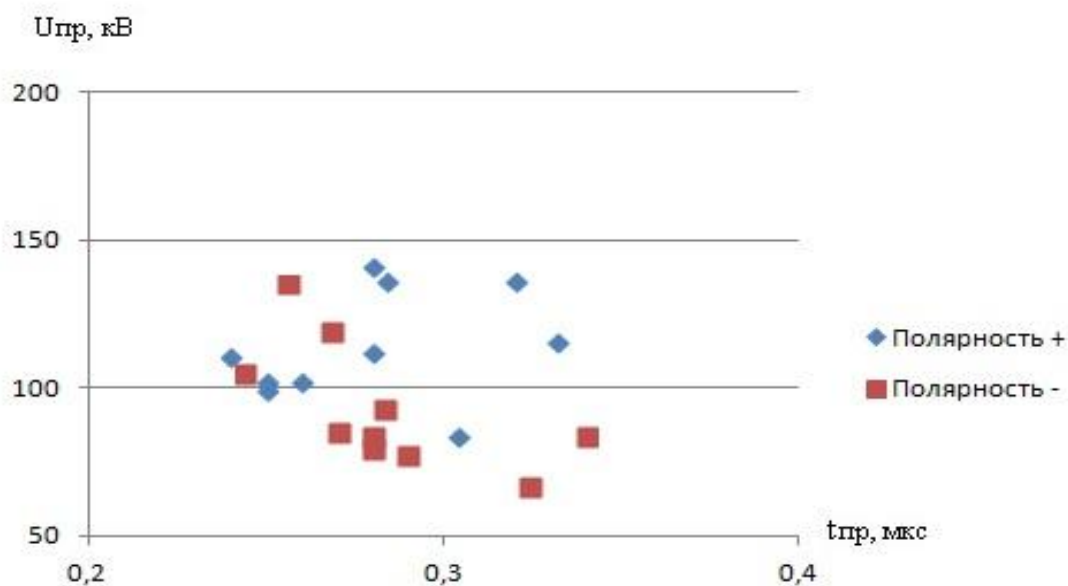


Рисунок 30 – Вольт – временная характеристика пробоя песчаника в воде при расстоянии $S = 30$ мм

Подтверждается эффект большего пробивного напряжения на положительной полярности по сравнению с отрицательной. При этом увеличивается время до пробоя, которое на обеих полярностях практически совпадает (таблица 6, рис.30). Среднее пробивное напряжения в 1,29 раза меньше, чем расчётное по [11] и незначительно больше по сравнению с $S = 20$ мм (табл. 5).

4.3 Пробой и разрушения гранита

Гранит – магматическая горная порода широко распространённая в природе. Гранит имеет очень широкий диапазон изменения физико – механических характеристик. Нами выбран гранит с одноосной прочностью на сжатия 80 – 100 МПа с коэффициентам прочности по М. М. Протодьяконова 10 – 12, что соответствует средним по крепости горным породам. Известно, что электроимпульсной пробой и разрушение зависит от физико – механических свойств горных пород.

Исследование ЭИ эффекта проводились нами в воде при расстоянии между электродами $S = 20$ и $S = 30$ мм. В таблице 7 приведены результаты экспериментов для расстояния $S = 20$ мм.

Таблица 7. Характеристики пробоя и разрушения гранита при расстоянии $S = 20$ мм

№	1	2	3	4	5	6	Среднее	$U_{пр}^+ / U_{пр}^-$
$t_{пр}^+$, мкс	0,208	0,268; 0,212	0,356; 0,252	0,248	0,250; 0,232	0,260; 0,230	0,248	1,77
$t_{пр}^-$, мкс	0,160	0,324; 0,164	0,252; 0,252	0,304	0,300; 0,248	0,310; 0,320	0,264	
$U_{пр}^+$, кВ	112	132; 140	179; 170	138	133; 125; 166	165; 141	151	
$U_{пр}^-$, кВ	69,6	74,3; 72,6	142,5; 95	72,6	71,2; 74,3; 97	100; 66,5	87	
$U_{пр\Sigma}$, кВ	182	206; 212	321; 265	210	204; 199; 263	265; 207	243	
h, мм	1,4	6,2	5,5	4,5	12	5	5,3	
Q, см ³ /имп	0,05	0,65	0,2	0,6	1,87	0,9	0,645	

На основании этих результатов построен рисунок 31. Видно, что время до пробоя на разнополярных импульсах практически совпадает, но существенно различаются пробивные напряжения: на положительной полярности среднее

пробивной напряжение в 1,77 раза выше, чем на отрицательный (табл. 7,8), что подтверждают эффект полученные на песчанике. Суммарное пробивное напряжения для гранита при $S = 20$ мм в 01,29 раза меньше, чем расчётная по [11] (табл. 6).

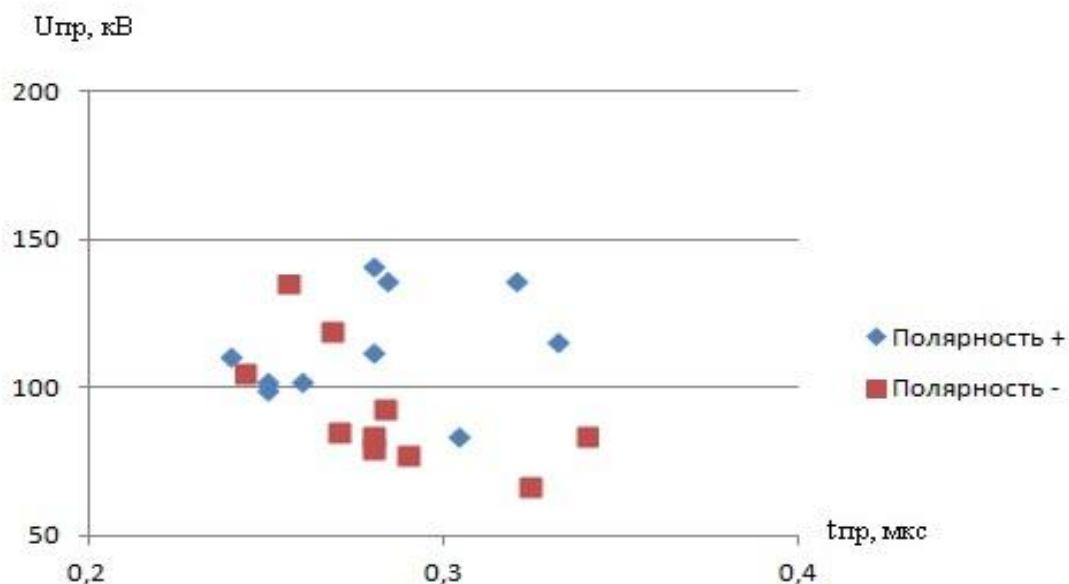


Рисунок 31 – Вольт – временная характеристика пробоя гранита в воде при расстоянии $S = 20$ мм

Глубина разрушения гранита при внедрении канала разряда несколько меньше расчётной, что в первую очередь, зависит от количества испытательных образцов (6 штук) и числу поданных на образец импульсов (2импульса): чем больше подано импульсов, тем больше глубина разрушения[11]. Основной показатель разрушения – производительность. Она для гранита при расстоянии $S = 20$ мм соответствует расчётным значения (табл. 9).

Поскольку для ЭИ эффекта на границе характерна вероятностная зависимость внедрения канала разряда в образец, особенно для первого воздействующего импульса, то следует ожидать изменения показателей

разрушения как с увеличением расстояние между электродами, так и с увеличением числа поданных импульсов.

Экспериментальные результаты для расстояния $S = 30$ мм приведены в таблицы 8 и на рисунке 32.

Таблица 8. Характеристики пробоя и разрушения гранита при расстоянии $S = 30$ мм

№	1	2	3	4	5	6	7	Среднее	$U_{\text{пр}}^+ / U_{\text{пр}}^-$
$t_{\text{пр}}^+$, мкс	0,260; 0,290	0,250	0,320; 0,390; 0,390	0,430; 0,340; 0,300	0,580; 0,320; 0,360	0,380; 0,320; 0,400	1; 0,560; 0,400	0,409	1,44
$t_{\text{пр}}^-$, мкс	0,144; 0,180	0,310	0,270; 0,350; 0,330	0,340; 0,330; 0,200	0,530; 0,390; 0,310	0,390; 0,320; 0,470	1,1; 0,560; 0,400	0,385	
$U_{\text{пр}}^+$, кВ	141; 152	182	172; 131; 141	141; 71,5; 147	192; 203; 99	178; 172; 176	188; 191; 177	172	

Продолжение таблицы 8.

$U_{\text{пр}}^-, \text{кВ}$	85,6; 89,5	107	123; 112; 120	111; 90,5; 95	120; 120; 119	127; 125; 114	125; 122; 115	119	
$U_{\text{пр}\Sigma}, \text{кВ}$	226; 242	293	295; 243; 261	252; 162	312; 323; 218	304; 297; 290	313; 313; 292	272	
h, мм	10	8	8	7	8,5	6	4	7,36	
Q, см ³ /имп	2,5	0,92	1,03	—	—	0,53	0,3	1,056	

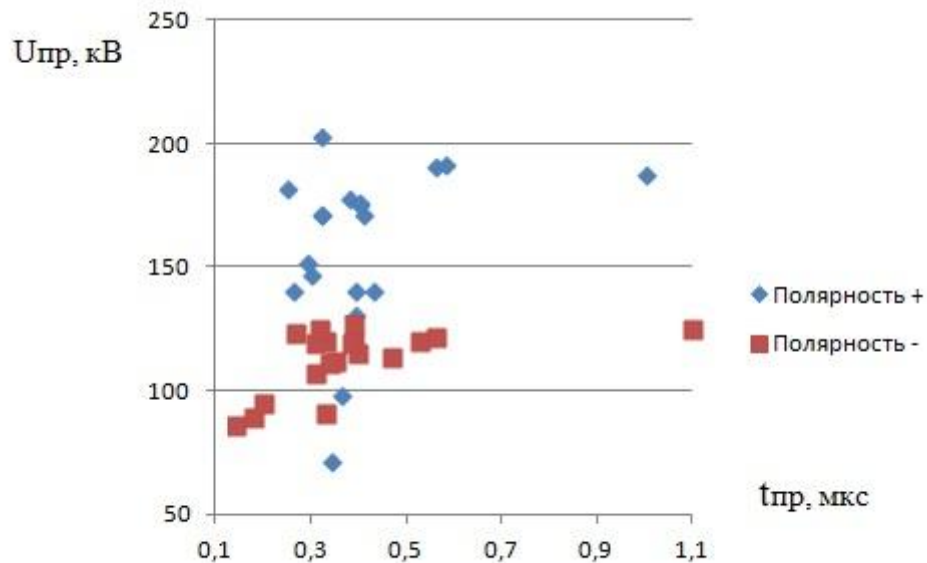


Рисунок 32 – Вольт – временная характеристика пробоя гранита в воде при расстоянии $S = 30$ мм

Испытано 7 образцов при воздействии 2 – 3 импульсов. Время пробоя для положительной и отрицательной полярности импульсов практически совпадают с рисунком 30, но больше, чем для расстояния $S = 20$ мм (табл. 8,9). Пробой происходит на амплитуду и спадающую часть импульса, что приводит существенной дисперсии времени до пробоя. Пробивное напряжение на положительной полярности в 1,44 раза больше, чем на отрицательной, что меньше чем для $S = 20$ мм (табл. 7). Среднее суммарное пробивное напряжения гранита для расстояния $S = 30$ мм меньше расчётного в 1,14 раза по [11], в свою очередь меньше чем для $S = 20$ мм (табл. 9). О причинах этого пока судить затруднительно, необходим большой систематически объем экспериментов. Средняя глубина разрушения для экспериментов при $S = 30$ мм хорошо характеризует с расчётом по [11] (табл. 6). Производительность разрушения при экспериментах меньше чем расчётная в 1,36 раза(табл. 9).

Таблица 9. Средние характеристики пробоа и разрушения

Материал	Вода	Песчаник	Песчаник	Гранит	Гранит
S , мм	15	20	30	20	30
$t_{\text{пр}}^+$, мкс	0,773	0,225	0,280	0,248	0,409
$t_{\text{пр}}^-$, мкс	0,787	0,178	0,283	0,263	0,385
$U_{\text{пр}}^+ / U_{\text{пр}}^-$	1,33	1,15	1,23	1,73	1,44
$U_{\text{пр}\Sigma}$, кВ	299	202	209	213	272
$U_{\text{расч}}$, кВ	—	234	270	275	311
h , мм	—	4,65	5,7	5,3	7,36
$h_{\text{расч}}$, мм	—	3,7	5,4	6,05	8,2
Q , см ³ /имп	—	0,9	0,91	0,645	1,056
$Q_{\text{расч}}$, см ³ /имп	—	0,43	0,967	0,64	1,44
$U_{\text{расч}}/U_{\Sigma}$	—	1,16	1,23	1,29	1,14
$Q_{\text{расч}}/Q$	—	0,445	1,06	~ 1	1,36

4.4 Анализ экспериментальных результатов

Эксперименты по одновременному воздействию высоковольтных импульсов на горные породы в воде проведены впервые нами. Для их реализации необходимо было разработать как технологические устройства, так и методического обеспечения, в частности выбор материала и размеров образцов пород, так как от этого преимущественно зависит как точность измерения, так и достоверность результатов. Необходимо отметить, что достоверность полученных результатов не высокая, так как объем статистических результатов мал. Тем не менее, можно выделить минимум два фактора характерных для одновременного воздействия двух разнополярных импульсов на горную породу:

- напряжение пробоя на положительной полярности больше, чем на отрицательной, как для песчаника, так и для гранита независимо от расстояния между электродами.

- суммарное пробивное напряжение при одновременном воздействии двух разнополярных импульсов меньше, чем при воздействии однополярных импульсов для исследованных расстояний между электродами.

Второй фактор имеет очень большое значение для электроимпульсных технологий бурения и резания горных пород, так как величина рабочего напряжения определяет надёжность работы всех высоковольтных передающих устройств (надёжность работы твёрдой изоляции) и надёжность работы высоковольтного импульсного генератора (в первую очередь высоковольтных конденсаторов). Кроме указанного, генераторы высоковольтных импульсов изготавливаются на номинальное напряжение в 2 раза меньше, чем при пробое с однополярным импульсом. Это может иметь решающее значение при дальнейшем развитии электроимпульсной технологий.

Для объяснения первого фактора необходимы специальные физические исследования зарождения развития, завершения канала разряда как жидкости, так и в твёрдом теле при одновременном воздействии двух разнополярных импульсов. Современные данные показывают что при положительной полярности импульса напряжения зажигания разрядов в жидкости и твёрдом теле меньше, чем на отрицательной полярности. Следовательно на положительной полярности канал разряда возникает раньше, чем на отрицательной. Кроме этого скорость развития канала разряда по поверхности твёрдого диэлектрика в воде (как в нашем случае) на положительной полярности ($\sim 9 \cdot 10^6$ см/с) выше, чем на отрицательной ($\sim 7 \cdot 10^6$ см/с). А скорость развития разряда в твёрдом теле существенно больше, что по поверхности и составляет $\sim 20 \cdot 10^6$ см/с для положительной полярности и $\sim 16 \cdot 10^6$ см/с для отрицательной. Эти данные позволяют предположить, что при двух полярном воздействии импульсного напряжения на твёрдые диэлектрики преимущества во временном и пространственном развитии канала разряда имеет положительная полярность.

5. Финансовый менеджмент

5.1 Введение

В данном разделе представлена оценка коммерческого потенциала, планирование проекта, расчет затрат на проектирование для проведения научно-исследовательской работы (НИР) «Применение разнополярных импульсов для бурения и резания горных пород», а также расчет капитальных вложений в последующую реализацию проекта и экономическую эффективность проекта.

Цель работы – применение разнополярных импульсов для бурения и резания горных пород.

В процессе работы рассматривался метод электроимпульсного разрушения горных пород разнополярными импульсами.

Основные конструктивные и технико-эксплуатационные показатели: высокая степень разрушения при меньшем напряжении, отсутствие химических реагентов, что делает его экологически чистым и достаточно эффективным для разрушения высокопрочных пород.

5.2 Предпроектный анализ

5.2.1 Потенциальные потребители

Предпроектный анализ позволит установить соответствие интересов инвестора и участника. Необходимо произвести анализ уже имеющихся конкурентных технических решений, также необходимо определить потребителей, дать оценку готовности проекта к коммерциализации.

Сегмент рынка – энергетика;

Отрасль – ЭИ бурения и резания;

Определенная услуга – Бурения скважин.

Карта сегментирования рынка приведена в таблице 10.

Таблица 10 – Карта сегментирования рынка

		Эксплуатанты отрасли					
		Оптовые генерирующие компании (ОГК)	Территориальные генерирующие компании (ТГК)	Распределительные компании (РК)	Сетевые компании (СК)	Промышленность (крупная)	Мелкие производства
Виды бурения	Химический	х	х			х	
	Вращательный	х	х	х	х	х	
	Вибрационный	х	х	х	х	х	
	Термический			х	х	х	х
	Ударный	х	х	х	х	х	х

Бурения затрагивает многие сегменты, что и показывает нам карта сегментирования.

В настоящее время в основном применяются механические методы, которые являются недостаточно эффективными в бурении, связи с этим к ЭИ способу бурения проявляют интерес следующие иностранные компании: компания в Швейцарии, Норвегии и в Германии – Schlumberger.

Электроимпульсный способ имеет следующие конкурентные преимущества по сравнению с механическим способом:

- 1) бездолотное разрушение горных пород исключаящее потери энергии на трение;
- 2) разрушение горной породы в импульсном режиме, устраняющее значительный расход энергии на пластическую деформацию, позволяющее концентрировать большие мощности при невысоких исходных количествах энергии;
- 3) обеспечение регулируемой степени измельчения, устраняющее затраты энергии на переизмельчение продуктов разрушения;

4) отсутствие промежуточных трансформаций энергии, связанных со значительными её потерями;

5) отсутствие значительной зависимости производительности процесса разрушения от крепости горных пород;

Совершенствование методов бурения позволит улучшить качество нефтяных скважин, снизить затраты на эксплуатацию и ремонт. Это положительно повлияет на все сектора.

5.2.2 SWOT-анализ

SWOT – *Strengths* (сильные стороны), *Weaknesses* (слабые стороны), *Opportunities* (возможности) и *Threats* (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. *SWOT*-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Анализ проекта сведем в таблицу 11.

Таблица 11 – Итоговая матрица SWOT

	Strengths (сильные стороны)	Weaknesses (слабые стороны)
	S1. Экологическая безопасность	W1. Отсутствие бизнес-плана коммерциализации
	S2. Относительная простота метода	W2. Не проработаны вопросы использования инфраструктуры поддержки
	S3. Высокая эффективность	W3. Не проработаны вопросы выхода на международный рынок
	S4. Возможность использования метода без вывода оборудования из работы	W4. Высокая вероятность поражения электрическим током
	S5. Использование электричества (удобство источника энергии)	

<p>Opportunities (возможности)</p> <p>O1. Увеличение числа аварий, связанных с техническим состоянием ЭО в электроэнергетической отрасли</p> <p>O2. Старение парка имеющегося силового ЭО и постепенная его замена на новое ЭО в энергосистемах</p> <p>O3. Повышение требований к синхронности работы ЭО</p> <p>O4. Ужесточение требований к качеству выпускаемого силового ЭО (ГОСТ Р 53471-2009 и ГОСТ Р 52719-2007)</p> <p>O5. Интерес со стороны зарубежных инвесторов к разработке</p>	<p>O1O2O3O4S5 – использование технологии для диагностики нового или производимого оборудования для улучшения качества выпускаемой продукции</p> <p>Высокая эффективность бурения при меньших подаваемых напряжениях позволит уменьшить количество затрат на оборудования.</p>	<p>O1W4 – проработать методику определения конкретного вида повреждения ЭО.</p>
<p>Threats (угрозы)</p> <p>T1. Незаинтересованность крупных российских энергокомпаний в разрабатываемой технологии</p> <p>T2. Отсутствие спроса на данный метод в отрасли</p> <p>T3. Высокие требования к технике безопасности в отрасли</p>	<p>T1T3S5 – Бурения без вывода оборудования из работы потребует высокой квалификации персонала и повысит требования к технике безопасности</p>	<p>T1W1 – заинтересовать компании проработанной методикой диагностики ЭО</p> <p>T2W2W3 – разработать бизнес-план коммерциализации и использовать инфраструктуру НИ ТПУ</p> <p>T3W2W4 – использовать рекламу для иностранных компаний</p>

Сильные стороны исследовательской работы создадут следующие возможности: снижение числа аварий и нештатных ситуаций, увеличение надёжности энергосистемы, улучшение качества бурения. Данные возможности позволят потребителям и энергокомпаниям снизить затраты на ремонт, ущерб от останова производства и новое силовое ЭО. Повысится спрос на новую технологию бурения, а значит, увеличится финансовая привлекательность проекта.

5.2.3 Оценка готовности проекта к коммерциализации

Оценим готовность проекта к коммерциализации, заполнив соответствующую таблицу.

Таблица 12 – Оценка степени готовности научного проекта к коммерциализации

№ п/п	Наименование	Степень проработанности научного проекта	Уровень имеющихся знаний у разработчика
1.	Определен имеющийся научно-технический задел	5	5
2.	Определены перспективные направления коммерциализации научно-технического Задела	4	5
3.	Определены отрасли и технологии (товары, услуги) для предложения на рынке	4	5
4.	Определена товарная форма научно-технического задела для представления на рынок	4	4
5.	Определены авторы и осуществлена охрана их прав	4	3
6.	Проведена оценка стоимости интеллектуальной собственности	2	2
7.	Проведены маркетинговые исследования рынков сбыта	3	2
8.	Разработан бизнес-план коммерциализации научной разработки	2	2
9.	Определены пути продвижения научной разработки на рынок	3	3
10.	Разработана стратегия (форма) реализации научной разработки	4	4
11.	Проработаны вопросы международного сотрудничества и выхода на зарубежный рынок	1	2
12.	Проработаны вопросы использования услуг инфраструктуры поддержки, получения льгот	1	2
13.	Проработаны вопросы финансирования коммерциализации научной разработки	2	1
14.	Имеется команда для коммерциализации научной разработки	4	5
15.	Проработан механизм реализации научного проекта	4	4
	ИТОГО БАЛЛОВ	47	49

По суммарным значениям баллов $B_{\text{СУМ}} = 49$ можно сказать, что проект обладает перспективностью выше среднего. Значение позволяет говорить о готовности научной разработки и ее разработчика к коммерциализации.

Тем не менее, произведенная оценка готовности научной разработки требует дальнейшего совершенствования проекта и более глубоких исследований в области маркетинга.

5.2.4 Виды коммерциализации

При коммерциализации научно-технических разработок продавец (а это, как правило, владелец соответствующих объектов интеллектуальной собственности), преследует вполне определенную цель, которая во многом зависит от того, куда в последующем он намерен направить (использовать, вложить) полученный коммерческий эффект. Это может быть получение средств для продолжения своих научных исследований и разработок (получение финансирования, оборудования, уникальных материалов, других научно-технических разработок и т.д.), одноразовое получение финансовых ресурсов для каких-либо целей или для накопления, обеспечение постоянного притока финансовых средств, а также их различные сочетания.

Для данной разработки наиболее подходит инжиниринг, т.е. комплекс инженерно-консультационных услуг коммерческого характера по подготовке и обеспечению непосредственно процесса производства, обслуживанию сооружений, эксплуатации хозяйственных объектов и реализации продукции.

Возможна следующая схема коммерциализации: между НИ ТПУ и предприятием-заказчиком инжиниринговых услуг заключается хозяйственный договор. Исполнитель предоставляет аппарат, собранный на средства предприятия-заказчика с использованием производственной базы НИ ТПУ, и услуги диагностики для предприятия-заказчика.

5.3 Инициация проекта

5.3.1 Цели и результат проекта

В рамках инициации определяются цели и содержание проекта, определяется объем финансирования.

Определим заинтересованные стороны и их ожидания, результат сведем в таблицу 13.

Таблица 13 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Получения патента
Руководитель проекта	Реализация проекта, получение гранта, компенсация трудозатрат
Исполнитель проекта	Получение степени магистра, компенсация трудозатрат
НИ ТПУ	Привлечение средств, рост рейтинга ТПУ, рост зарплаты сотрудников, получение новых статей.
Schlumberger	Снижение аварийности, повышение надежности буровых установок
Компания из Швейцарии	Снижение аварийности, бездолотное разрушение горных пород

Определим цели и результаты проекта, сведя их в таблицу 14.

Таблица 14 – Цели и результат проекта

Цели проекта:	Проанализировать электроимпульсный способ бурения.
Ожидаемые результаты проекта:	Действенное использование метода для разрушения и бурения горных пород
Критерии приемки результата проекта:	Получения большего объема разрушения горных пород при меньших напряжениях в сравнении с обычными способами.

5.3.2 Организационная структура проекта

Исполнителей и их роли в создании проекта сведем в таблицу 15.

Таблица 15 – Рабочая группа проекта

№ п/п	ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудо-затраты, час.
-------	---------------------------------------	----------------	---------	---------------------

1	Важов Владислав Фёдорович НИ ТПУ <i>Доцент, д.т.н.</i> <i>Кафедра ЭЭС</i>	Руководитель проекта	1. Анализ имеющихся технических решений и результатов. 2. Проведение экспериментов	325
2	Кулякин Артём Николаевич НИ ТПУ <i>Студент группы 5АМБА</i>	Исполнитель по проекту	1. Подготовка и проведение экспериментов. 2. Анализ результатов экспериментов.	870
ИТОГО:				1195

5.3.3 Ограничения и допущения

Ограничения и допущения сведем в таблицу 16.

Таблица 16 – Ограничения проекта

Фактор	Ограничения/ допущения
1. Бюджет проекта	593447,2 руб.
1.1. Источник финансирования	Собственные средства, в т.ч. ОС ТПУ, собственные средства сотрудника и исполнителя проекта.
1.2. Сроки проекта:	10 октября 2017 г. – 24 мая 2018 г.
1.2.1. Дата утверждения плана управления проектом	10 октября 2017 г.
1.2.2. Дата завершения проекта	24 мая 2018 г.
1.3. Прочие ограничения и допущения*	-

В результате проведения инициации проекта сформулированы цели и предполагаемые результаты, определены заинтересованные стороны проекта

и финансовые рамки, что очень важно для успешного завершения проекта и его реализации.

5.4 Планирование научно-технического проекта

Особенность НИР в энергетической области это ее неповторимость, сложность и уникальность.

Последовательность выполнения научно-исследовательской работы, а также ее содержание зависят от предмета исследования, сложности научно-исследовательской работы, актуальности и новизны темы.

5.4.1 Контрольные события проекта

В рамках данного раздела необходимо определить ключевые события проекта, определить их даты и результаты, которые должны быть получены по состоянию на эти даты.

Таблица 17 – Контрольные события проекта

№ п/п	Контрольное событие	Дата	Результат
1	Начало изучения методов ЭИ бурения	15.10.17	Обобщение и систематизация информации
2	Выбор образцов для исследования	08.11.17	Сбор образцов
3	Календарное планирование работ	18.11.17	Составление плана работ
4	Планирование проведения экспериментальных исследований	29.11.17	Сборка схемы экспериментальной установки

5	Экспериментальные исследования, обработка полученных данных	11.12.17	Разрушения гранита разнополярными импульсами высокого напряжения
6	Анализ полученных результатов, формулировка выводов, оценка эффективности результатов.	25.12.17	Составление отчета по полученным данным, написание основной части

5.4.2 План проекта

В рамках планирования научного проекта необходимо построить календарный график проекта.

Линейный график представляется в виде таблицы.

Таблица 18 – Календарный график проекта

№	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Составление ТЗ и его утверждение	1	11.10.17	12.10.17	Руководитель проекта
2	Изучение литературы и прочих материалов по теме	16	16.10.17	01.11.17	Руководитель проекта, исполнитель проекта
3	Составление схемы экспериментальной установки	4	01.11.17	05.11.17	Исполнитель проекта
4	Подбор образцов	5	05.11.17	10.11.17	Исполнитель проекта
5	Подбор и изучение объекта исследований	3	10.11.17	13.11.17	Руководитель проекта, исполнитель проекта
6	Сборка экспериментальной установки	2	13.11.17	15.11.17	Исполнитель проекта

Продолжение таблицы 18

7	Проведение серии первичных экспериментов	12	15.11.17	27.11.17	Исполнитель проекта
8	Компьютерное моделирование ударного нагружения образцов	12	29.11.17	11.12.17	Исполнитель проекта
9	Обработка полученных данных	4	11.12.17	15.12.17	Исполнитель проекта
10	Анализ полученных результатов, формулировка выводов	4	19.12.17	23.12.17	Исполнитель проекта
11	Оценка эффективности и анализ результатов	67	24.12.17	01.03.18	Руководитель проекта, исполнитель проекта
12	Оформление результатов в форме ПЗ	64	14.03.18	24.05.18	Исполнитель проекта
Итого:		Руководитель проекта		87	
		Исполнитель проекта		193	

5.4.3 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета научного исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов планируемых расходов, необходимых для его выполнения. В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям, представленным в таблице.

Компенсация трудозатрат

Компенсацию ТЗ определим на основе показателя среднедневных оплат труда, принятого в ТПУ. Для этого оценим основную и дополнительную заработные платы.

Основная заработная плата сотрудника (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда.

Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИР и определяется по формуле:

$$C_{ЗП} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (15)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата, руб;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата, руб.

Основная заработная плата:

$$Z_{осн} = Z_{он} \cdot T_{раб}, \quad (16)$$

где $T_{раб}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{он}$ – среднедневная заработная плата работника, руб./день.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (17)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб./мес.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 20).

Таблица 20 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней: <ul style="list-style-type: none"> • выходные дни и праздничные дни 	66	66
Потери рабочего времени: <ul style="list-style-type: none"> • отпуск и невыходы по болезни 	56	52
Действительный годовой фонд рабочего времени	243	247

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_m = Z_{\text{б}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_p, \quad (18)$$

где $Z_{\text{б}}$ – базовый оклад, руб./мес.;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Гомска).

Основная заработная плата руководителя (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1) оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст.

преподаватель, доцент, профессор. Базовый оклад $Z_б$ определяется исходя из размеров окладов, определенных штатным расписанием предприятия.

2) стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

3) иные выплаты; районный коэффициент.

Таблица 21 – Расчёт основной заработной платы

Исполнители	$Z_б$, руб./мес.	k_p	$Z_м$, руб./мес.	$Z_{дн}$, руб./день	T_p , раб. дн.	$Z_{осн.}$, руб.
Исполнитель	17000	1,3	22100	1002	196	196392
Руководитель	26300	1,3	34190	1551	80	124080
Итого:	43300		56290	2553		320472

Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п. (в среднем – 12 % от суммы основной заработной платы).

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (19)$$

Таблица 22 – Заработная плата

Заработная плата	Исполнитель	Руководитель	Сумма
Основная зарплата	196392	124080	320472
Дополнительная зарплата	23567	14890	38457
Итого $C_{зн}$	358929		

Отчисления на социальные нужды

Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{соц} = k_{внеб} \cdot C_{ЗП}, \quad (20)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.), равный 0,271, т.к. заключался хозяйственный договор с НИ ТПУ.

$$C_{соц} = 0,271 \cdot 358929 = 97255,75 \text{ руб.}$$

Затраты на оформление патента

Благодаря оформлению патентов на различные товары, способы создания изделий и т. д., есть возможность обеспечить защиту от контрабандного производства изделий, и не иметь проблем с законом, если вдруг на создаваемый товар получают патент и ваши конкуренты. Также авторство на патенты дает возможность вам получить доход от того, что вы передадите права на его применение другим лицам. Согласно законам РФ, изобретением может быть признано то или иное техническое решение различных отраслей, которое относится к продукту или способу его производства. На 2018 г. стоимость оформления патента составляет ≈ 8000 руб.

Сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты (за вычетом отходов)

В эту статью включаются затраты на приобретение всех видов материалов, комплектующих изделий и полуфабрикатов, необходимых для выполнения работ по данной теме. Количество потребных материальных ценностей определяется по нормам расхода.

Расчет стоимости материальных затрат производится по действующим прейскурантам или договорным ценам. В стоимость материальных затрат включают транспортно-заготовительные расходы (3 – 5 % от цены). В эту же статью включаются затраты на оформление документации (канцелярские принадлежности, тиражирование материалов). Результаты по данной статье заносятся в таблицу 23.

Таблица 23 – Сырье, материалы и комплектующие изделия

Наименование	Марка, размер	Количество	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Перчатки	-	2 шт.	25	50
Нож	-	1 шт.	60	60
Кусачки	КВТ	1 шт.	400	400
Кабель для электродов	СЕ-5-В	5 м.	1284	7382
Изолента	Navigator	1 шт.	20	20
Набор отверток	КВТ	1 шт.	600	600
Набор гаечных ключей	Hardax	1 шт.	651	651
Маркер перманентный	P-800W	1 шт.	50	50
Указатель напряжения	-	1 шт.	28	28
Тетрадь	Общая, 48 л.	1 шт.	50	50
Бумага «Снегурочка»	A4, 500 л.	1 шт.	240	240
Итого за материалы и изделия				9531
Транспортно-заготовительные расходы (3-5%)				478
Итого по статье C_m				10009

Специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ по конкретной теме. Определение стоимости спецоборудования производится по действующим прейскурантам, а в ряде случаев по договорной цене.

Таблица 24– Специальное оборудование для экспериментальных работ

Наименование оборудования	Количество единиц	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
1. Мультиметр MASTECH M830B	1 шт.	550	550
Итого			550

Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{итог} = \frac{C_{итог.б.н}}{0,8}, \quad (21)$$

$$C_{накл} = C_{итог} - C_{итог.б.н}, \quad (22)$$

где $C_{итог}$ – итоговая сумма с накладными расходами;

$C_{итог.б.н}$ – итоговая сумма без накладных расходов.

$$C_{итог} = \frac{474757,76}{0,8} = 593447,2 \text{ руб.}$$

$$C_{накл} = 593447,2 - 474757,76 = 118689,44 \text{ руб.}$$

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НТИ (название темы) по форме, приведенной в таблице 25.

Таблица 25 – Группировка затрат по статьям

Статьи								
Сырье, материалы	Специальное оборудование	Основная зарботная плата	Дополнительная зарботная плата	Отчисления на социальные нужды	Оформление патента	Итого без накладных расходов	Накладные Расходы	Итого плановая себестоимость
10009	550	320472	38457	97255,75	8000	474757,76	118689,44	593227,2

5.4.4 Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты.

Таблица 26 – Реестр рисков

Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска	Способы смягчения риска	Условия наступления
1. Несоблюдение техники безопасности	Травмы, летальные исходы	4	2	Средний	Повышение квалификации персонала	Несоответствие технике безопасности
2. Отсутствие финансовой поддержки проекта	Приостановка НИОКР	2	1	Высокий	Поиск инвесторов	Отсутствие инвесторов

5.5 Определение финансовой, бюджетной, экономической и социальной эффективности исследования

На предыдущих этапах была рассчитана себестоимость реализации проекта, выбрана модель коммерциализации, рассмотрены риски.

Для оценки общей экономической эффективности инноваций в качестве основных показателей рекомендуются:

- чистый доход (ЧД или NV);
- чистый дисконтированный доход (ЧДД или NPV);
- внутренняя норма доходности (ВНД или IRR);
- потребность в дополнительном финансировании (ПФ);
- дисконтированный срок окупаемости (ДСО или DPP);
- индекс доходности затрат (ИД или PI)

Степень устойчивости проекта по отношению к возможным изменениям условий реализации может быть охарактеризована показателями границ безубыточности и предельных значений таких параметров проекта, как объемы производства, цены производимой продукции, ограниченность применяемых ресурсов и пр. Под "безубыточным" понимается объем продаж, при котором чистая прибыль становится равной нулю.

План денежных потоков и расчётов безубыточности приведён в таблице 27. Срок проекта принимаем равным 5 лет, т.к. за это время возможно появление новых, более совершенных технологий.

Рентабельность собственного производства на 2017 г. в энергетике равна 19,2% [13]. Ставку дисконтирования посчитаем согласно [14].

Цену одного хозяйственного договора примем как 250000 руб, согласно ценам на силовое оборудования высокого напряжения.

Ликвидационную стоимость оборудования примем по остаточной стоимости оборудования: 250 тыс. руб.

Таблица 27 – План денежных потоков и расчёт безубыточности

Показатель, тыс. руб.	Номер шага (периода) расчета (t)					
	0	1	2	3	4	5
Операционная деятельность						
1. Поступления денежных средств от хоздоговоров	0	250	500	520	780	520
2. Материальные расходы	0	-120	-205	-205	-303	-210
3. ЧДПоп	0	130	295	315	477	310
4. Коэффициент дисконтирования	1	0,825	0,681	0,562	0,463	0,382
5. Дисконтированный ЧДПоп	0	107,25	200,895	177,03	220,851	118,42
6. То же накопленным итогом (Накопленное сальдо ЧДПоп)	0	107,25	308,145	485,175	706,026	824,446
Инвестиционная деятельность						
7. Инвестиции	-593	0	0	0	0	250
8. ЧДПин	-593	0	0	0	0	250
9. Коэффициент дисконтирования	1	0,825	0,681	0,562	0,463	0,382
10. Дисконтированный ЧДПин	-593	0	0	0	0	95,5
11. То же накопленным итогом (Накопленное сальдо ЧДПин)	-593	-593	-593	-593	-593	-497,5
12. Сальдо суммарного потока (от опер. и инв. деятельности)	-593	130	295	315	477	560
13. Сальдо накопленного потока	-593	-463	-168	147	624	1184
14. Коэффициент дисконтирования	1	0,825	0,681	0,562	0,463	0,382
15. Дисконтированный ЧДПоп+и	-593	107,25	200,895	177,03	220,851	213,92
16. То же накопленным итогом	-593	-597,75	-396,855	-219,825	1,026	214,496

Денежный поток в данном случае формируется для ТПУ и частного инвестора (которым выступают сами исполнители). Принимая в расчет структуру расходов по хоздоговорам, а именно: компенсация трудовых затрат, отчисления во внебюджетные фонды, материальные затраты, накладные расходы, притоком денежных средств по хоздоговору будет являться величина хоздоговора, уменьшенная на сумму материальных и прочих расходов. При общей системе налогообложения доходы по хоздоговорам

равны расходам, в связи с чем налоги с доходов вузом не уплачиваются. Амортизация в структуру расходов по хоздоговорам не включается. Накладные расходы предлагается отнести к денежным притокам, отчисления во внебюджетные фонды – притоки в целях оценки эффективности для бюджета в связи с тем, что ТПУ представляет именно бюджетные инвестиции.

Чистый доход (ЧД) указан в последнем столбце 13 строки: ЧД = 1184 тыс.руб.

Чистый дисконтированный доход (ЧДД) указан в последнем столбце 16 строки: ЧДД = 214,496 тыс. руб.

ВНД определяется, исходя из строки 12, подбором значения нормы дисконта. Используя встроенную функцию расчета ВНД в программе Microsoft Excel (формула «ВСД»), получаем, что ВНД = 39 %. Это еще раз подтверждает эффективность проекта, так как $ВНД > E$. Потребность в финансировании (ПФ) определяется максимальным отрицательным значением по строке 13 и равна 593 тыс. руб.

Индекс доходности инвестиций дисконтированный (ИДД) или рентабельность инвестиций – отношение суммы доходов от производственной (операционной) деятельности к абсолютной величине капитальных вложений. Определяется как:

$$ИДД = \frac{ЧД_{опнак}}{ЧД_{иннак}} = \frac{824,446}{497,5} = 1,65 \quad (23)$$

Сроком окупаемости (payback period) называется продолжительность периода от момента разработки проекта до момента окупаемости. Он определяется путем сопоставления произведенных капитальных вложений с величиной доходов от реализации проекта. Моментом окупаемости называется тот наиболее ранний момент времени в расчетном периоде, после

которого текущий чистый доход ЧД становится и в дальнейшем остается неотрицательным. Дисконтированный срок окупаемости инвестиций:

$$ДСО = t + \frac{-C_{ni}}{C_{ci+1}} = 3 + \frac{219,825}{220,851} = 3,99 \text{ года} \quad (24)$$

где t – срок окупаемости, отсчитанный от начала операционной деятельности;

C_{ni} – сальдо накопленного потока i -го периода;

C_{ci+1} – сальдо суммарного потока $i+1$ -го периода.

Данный срок считается довольно приемлемым, так как это новая технология и нужно время для создания рынка и поиска потребителя.

5.6 Вывод по разделу

По итогам выполнения раздела была проведена оценка экономической эффективности и ресурс эффективности проекта. Из проведенных расчетов можно заключить, что устойчивость проекта особых подозрений не вызывает.

По результатам расчёта экономических показателей эффективности возврата инвестиций, можно сделать вывод о том, что проект является инвестиционно-привлекательным. Данный проект имеет хорошие экономические показатели (низкий бюджет, цена реализации лицензии, малый срок окупаемости и высокий индекс доходности).

Таким образом, привлечение средств ТПУ и собственных средств участников проекта могут считаться эффективными, а проект рекомендован к реализации.

