

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

На правах рукописи

Бухаркин Андрей Андреевич

**ПОДЗЕМНАЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ КОНВЕРСИЯ
ИСКОПАЕМЫХ ТВЁРДЫХ ТОПЛИВ**

Специальность 2.4.4. «Электротехнология и электрофизика»
Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Ремнёв Геннадий Ефимович

Томск – 2025

Введение.....	4
Глава 1. Подземная переработка ископаемых твёрдых топлив.....	13
1.1 Подземные способы разработки месторождений ископаемых твёрдых топлив	13
1.1.1 Подземная термическая конверсия ископаемых твёрдых топлив	14
1.1.2 Дутьевые технологии разработки месторождений ископаемых твёрдых топлив.....	15
1.1.3 Применение гидравлического разрыва пласта для разработки месторождений ископаемых твёрдых топлив.....	21
1.2 Характеризация ископаемых твёрдых топлив.....	23
1.2.1 Ископаемые твёрдые топлива как гетерогенный материал.....	23
1.2.2 Электрофизические свойства ископаемых твёрдых топлив.....	28
1.3 Электрофизические процессы в ископаемых твёрдых топливах	32
1.3.1 Пробой ископаемых твёрдых топлив.....	32
1.3.2 Электрическая деградация ископаемых твёрдых топлив	34
1.3.2.1 Диагностика частичных разрядов.....	36
1.3.3. Конверсия ископаемых твёрдых топлив джоулевым теплом в проводящем канале ...	40
Глава 2. Методика и аппаратное обеспечение исследования электрофизической конверсии.....	44
2.1. Этапы электрофизической конверсии	44
2.2. Лабораторный комплекс для исследования электрофизической конверсии ископаемых твёрдых топлив	45
2.3. Диагностическое оснащение и измерительное оборудование.....	47
2.4. Расчёт нагрузочной характеристики экспериментальной установки.....	53
Глава 3. Лабораторные исследования электрофизической конверсии ископаемых твёрдых топлив, на примере горючих сланцев месторождения Хуадянь (Китай)	56
3.1 Микроскопическое исследование горючих сланцев месторождения Хуадянь (Китай).....	56
3.2. Исследование элементного состава горючих сланцев месторождения Хуадянь (Китай)..	59
3.3. Инициация частичных разрядов в ископаемых твёрдых топливах, на примере горючих сланцев месторождения Хуадянь (Китай).....	63
3.4. Пробой и формирование проводящего канала в ископаемых твёрдых топливах.....	67
3.5. Продукты, получаемые при различных режимах электрофизической конверсии горючих сланцев месторождения Хуадянь (Китай).....	70
Глава 4. Полевые испытания электрофизической конверсии ископаемых твёрдых топлив, на примере каменного угля разрез «Богатырь» (Казахстан)	80
4.1. Испытательный полигон на разрезе «Богатырь» (Казахстан).....	80
4.2. Опытная полевая установка для испытания электрофизической конверсии ископаемых твёрдых топлив	83
4.3. Полевые испытания электрофизической конверсии каменного угля разрез «Богатырь» (Казахстан)	86

4.4. Оценочные испытания на масштабируемость и рекомендации по модернизации опытной полевой установки	91
4.5. Оценка полученных результатов и перспективы их использования.....	94
Заключение	99
Литература	101
Список основных работ, опубликованных по теме диссертации.....	107
Приложение А Дополнительные материалы по микроскопическим исследованиям горючих сланцев	111
Приложение Б Характерные осциллограммы начальных частичных разрядов в горючих сланцах	121
Приложение В Эскизы схем, разработанных в рамках модернизации полевой установки	123
Приложение Г Патенты, полученные в результате выполненной работы	132
Приложение Д Акт внедрения электрофизической конверсии угля.....	133

Введение

Актуальность

Ископаемые твердые топлива (ИТТ) обладают высоким потенциалом в качестве энергетического, топливного и химического сырья, в том числе для водородной энергетики. Главным образом за счёт повсеместного наличия месторождений, имеющих существенные запасы. «Зелёная» энергетика может стать альтернативным источником энергии и, при применении ряда технологий, существенно снизить потребность в топливе. Не смотря на активное внедрение альтернативных источников энергии, их доля остаётся низкой, а эксплуатация проявляет негативное влияние на экологию. При этом остаётся открытым вопрос альтернативы ископаемым топливам в качестве химического сырья. В итоге ископаемые твёрдые топлива ещё долгое время будут играть существенную роль в отраслях народного хозяйства. Согласно документам, регламентирующим приоритеты стратегического развития Российской экономики, развитие добывающих отраслей будет оставаться актуальным ещё как минимум десятилетие. В целях повышения эффективности, безопасности и экологичности технологии освоения потенциала ископаемых ресурсов постоянно совершенствуются.

Использование традиционных способов разработки месторождений ископаемых твердых топлив сопряжено с работой персонала в опасных и вредных условиях и негативными последствиями для экологии. Кроме того, строительство шахт и карьеров, извлечение породы и утилизация колоссального количества золошлаковых отходов влечёт за собой огромные издержки, отражающиеся, в том числе, на пороге рентабельности разработки конкретного месторождения. Вопрос рентабельности разработки особенно актуален для низкосортных ископаемых твёрдых топлив (НИТТ). Высокая зольность и, как следствие, низкая теплотворная способность и большое количество золошлаковых отходов делают НИТТ нерентабельными для традиционной добычи, за редким исключением. Один из перспективных путей комплексной модернизации технологий разработки ИТТ – подземная переработка твердой органической компоненты породы непосредственно на месте залегания пласта (*in-situ* способы). Решение обозначенных проблем позволит вовлечь в производство ранее нерентабельные месторождения ископаемых твёрдых топлив в том числе низкосортных. Кроме того, на территориях богатых залежами ископаемых твёрдых топлив, в том числе низкосортных, действуют организации из сектора разработки заинтересованные во внедрении таких технологий.

Существует большое количество *in-situ* способов разработки месторождений твердых топлив. Многие из них испытывались в полевых условиях, однако только две технологии прошли

все стадии разработки и внедрялись в промышленных масштабах на мировом уровне. Одна из них – разработанная в конце прошлого столетия подземная газификация угля (ПГУ, англ. – underground coal gasification (UCG)), нацеленная в основном на получение топливного газа с относительно низкой теплотворной способностью ~ 4 МДж/н. куб. м. Основные недостатки ПГУ заключаются в плохой управляемости процессом и наличием большого количества балластного газа в конечных продуктах. В результате эффективность подземной газификации довольно низкая, а получаемые продукты не универсальны с точки зрения конечной утилизации. Другой метод – гидравлический разрыв пласта (ГРП, англ. – hydraulic fracturing (Hydrofracking)), разработан в начале текущего столетия, применяется для извлечения газообразных и жидких, в том числе легкорастворимых, органических компонент, уже содержащихся в материнской породе (коллекторе). ГРП применяется на нефтематеринских породах, классифицируемых как горючие сланцы, для извлечения незрелой нефти и попутного природного газа. Месторождения, подходящие для гидроразрыва, должны обладать большой мощностью пласта и определённой степенью метаморфизма. Использование этой технологии сопряжено с экологическими рисками в связи с закачкой большого количества химикатов. Таким образом, ГРП весьма неуниверсальная технология разработки месторождений твердых топлив с повышенными экологическими рисками.

Один из оптимальных способов разработки месторождения непосредственно на месте залегания – нагрев породы. Нагрев осуществляется до температуры преобразования твердой органической компоненты твердого топлива в газообразные и жидкие продукты с последующим их извлечением. Такой подход не требует применения дутья, токсичных химических реагентов, весьма универсален, управляем и эффективен. Предлагаемая методика заключается в формировании проводящего канала непосредственно в породе под действием высокого напряжения и нагрева участка пласта джоулевым теплом.

Степень разработанности темы исследования

Агроскин Анатолий Абрамович всесторонне исследовал ископаемые твёрдые топлива, в основном, угли. Рассматривая электрофизические особенности ИТТ обобщил эпизодические исследования других авторов и привёл зависимость проводимости углей от большого числа параметров (влажность, степень метаморфизма, петрографический состав и др.). Агроскин отнёс угли к полупроводникам с высокой способностью к поляризации, классифицировав её как химическую. В общих чертах описал пробой породы высоким напряжением и предложил использовать это явление для газификации. Однако, исследования пробивных характеристик, механизмов пробоя и процесса газификации с использованием канала пробоя в работах Агроскина отсутствуют.

Более подробно вопросы пробоя и поляризационных эффектов в углях рассмотрел Каляцкий Иван Иванович. Основным направлением его работ было разрушение углей высоковольтными электрическими импульсами. При этом были получены некоторые данные по пробую породы на переменном и постоянном напряжении и специфическому распределению электрического поля в углях.

При попытках применить высокое напряжение высокой частоты для диэлектрического нагрева горючих сланцев Мартемьяновым Сергеем Михайловичем под руководством Лопатина Владимира Васильевича был обнаружен пробой породы. После чего выдвинута гипотеза о влиянии частичных разрядов на формирование канала пробоя. Получены газообразные продукты конверсии и проанализирован их состав.

Степень изученности термической конверсии ИТТ высока. В литературе, например, в работах Агроскина, Чистякова, Аронова, Хисина, приведено множество данных о влиянии на этот процесс различных параметров как топлива (влажность, зольность, степень метаморфизма и др.), так и методики (температура, скорость нагрева, сам способ и др.). Стоит отметить очень сильное влияние на характеристики (дебет, калорийность, состав, как химически, так и фазовый и др.) конечных продуктов оказывает применяемый способ конверсии. Параметры процесса подбираются под конкретный способ с учётом конечной цели. Подобные данные для конверсии потерями проводимости в канале пробоя в литературе отсутствуют.

Объект исследования

Прикладные аспекты использования проводящего канала, сформированного под действием высокого напряжения, в ископаемых твёрдых топливах для термической конверсии породы.

Предмет исследования

Зависимость характеристик электрофизических и термохимических процессов в ископаемых твёрдых топливах от электрических параметров воздействия на породу.

Цель диссертационной работы

Исследование термической конверсии ископаемых твёрдых топлив в газообразные и жидкие продукты в проводящем канале, сформированном при воздействии высокого напряжения.

Задачи исследования

1. Анализ электрофизических свойств ископаемых твёрдых топлив на основе их состава и структуры.
2. Определение процессов, происходящих в ископаемых твёрдых топливах при воздействии высокого напряжения.
3. Разработка оборудования, в том числе диагностического, для исследования электрофизических процессов в ископаемых твёрдых топливах под действием высокого напряжения и процессов электрофизической конверсии органического вещества твёрдых топлив в газообразные и жидкие продукты.
4. Определение влияния параметров электрофизического воздействия на конечные продукты конверсии ископаемых твёрдых топлив.
5. Разработка оборудования для проведения полевых испытаний электрофизического способа конверсии ископаемых твёрдых топлив.
6. Проведение полевых испытаний электрофизического способа конверсии ископаемых твёрдых топлив.

Научная новизна

1. Установлена зависимость основных характеристик начальных частичных разрядов в ископаемых твёрдых топливах от межэлектродного расстояния при напряжении промышленной частоты в двухэлектродной системе параллельных стержней, заключающаяся в слабом увеличении напряжения возникновения и резком снижении напряжённости возникновения при увеличении межэлектродного расстояния.
2. Впервые получены жидкие продукты, близкие по свойствам и качественному составу к природной нефти, электрофизической конверсией ископаемых твёрдых топлив.
3. Определена качественная зависимость состава продуктов электрофизической конверсии ископаемых твёрдых топлив от вводимой мощности до $3,7 \text{ кВт/дм}^3$, оптимальный максимум нарастания мощности $0,8 \text{ Вт/дм}^3 \text{ мин}$.
4. В результате натурных испытаний электрофизической конверсии ископаемых твёрдых топлив получено экспериментальное подтверждение предположению о весьма слабой зависимости напряжения пробоя ископаемых твёрдых топлив от расстояния при расстояниях более 0,5 м до 6 м.

Практическая значимость

1. Установлено, что режим медленного повышения мощности в процессе электрофизической конверсии позволяет получать жидкие продукты близкие по качественному

составу к природной нефти, а, следовательно, утилизируемые в известных технологических процессах.

2. Разработана и успешно введена в эксплуатацию опытная установка для электрофизической конверсии ископаемых твёрдых топлив в условиях непосредственного залегания.

3. Даны рекомендации по модернизации опытной установки для электрофизической конверсии ископаемых твёрдых топлив, экстраполируемые на опытно-промышленный образец установки.

4. Установлено, что значение напряжения 2 кВ достаточно для осуществления полного цикла электрофизической конверсии в условиях залегания пласта на разрезе «Богатырь» (Казахстан) при расстоянии между скважинами до 6 м.

Научные положения, выносимые на защиту

1. В ископаемых твёрдых топливах для межэлектродного расстояния до 200мм при увеличении межэлектродного расстояния в ~ 4 раза, напряжение возникновения частичных разрядов возрастает на $\sim 30\%$, а напряженность возникновения снижается в ~ 3 раза.

2. Из-за динамически изменяющегося сопротивления проводящего канала для получения более качественных продуктов электрофизической конверсии ископаемых твёрдых топлив необходимо увеличивать подводимую мощность со скоростью не превышающую $0,8 \text{ Вт/дм}^3 \text{ мин}$.

3. Необходимый уровень напряжения для осуществления полного цикла конверсии в полевых условиях при расстоянии между электродами до 6 м не превышает 2 кВ на разрезе «Богатырь» (Казахстан) и породах с аналогичными характеристиками и условиями залегания.

4. Из-за преобладания растекания тока по объёму породы над увеличением погонного сопротивления, сопротивление фрагмента угольного пласта в условиях естественного залегания при увеличении межэлектродного расстояния имеет слабо спадающий характер, в частности на разрезе «Богатырь» изменяется с 400 Ом до 300 Ом при изменении расстояния между скважинами с 1,5 м до 5,8 м.

Методология и методы исследования

Лабораторный исследовательский комплекс обеспечивает приложение напряжения к фрагменту ископаемых твёрдых топлив промышленной частоты до 100 кВ. Ток, обеспечиваемый комплексом на этапе термического разложения органической компоненты породы, составляет 264 А.

Использовалась электродная система из двух параллельных стержней с межэлектродным расстоянием до ~200 мм.

Измерения частичных разрядов в ископаемых твёрдых топливах выполнялись по токовой схеме в соответствие с методическими рекомендациями, изложенными в научной литературе и международным стандартом *IEC 60270*.

Лабораторные исследования термического разложения органической компоненты ископаемых твёрдых топлив осуществлялось в герметичной камере, в среде азота.

Исследования морфологии поверхности слома и микроанализ элементного состава горючих сланцев осуществлялись растровым электронным микроскопом *LEO1455VP* детектором отраженных электронов при ускоряющем напряжении 20 кВ.

Количественный элементный состав горючих сланцев определялся атомно-эмиссионной спектроскопией с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре *iCAP 6300 Duo, Thermo Scientific*.

Состав газообразных продуктов конверсии анализировался с помощью хроматографа *Agilent 7890 A* с колонкой *ShinCarbon ST (RESTEK)* и детектором по теплопроводности.

Качественный анализ фракций сланцевой нефти осуществлялся методом газовой хроматографии/масс-спектрометрии на газовом хроматографе *Agilent 7890 A* с селективным квадрупольным масс-детектором.

Достоверность результатов исследований обеспечивалась использованием аттестованного измерительного и аналитического оборудования, методик измерения параметров частичных разрядов, соответствующих рекомендациям данных в научно-технической литературе и международных стандартах, современных экспериментальных методов, общепризнанных аналитических методик исследования микроструктуры, элементного состава материала, качественного и количественного состава газов и жидкостей, систематическим характером исследований, непротиворечивостью полученных данных и их согласием с результатами других исследователей. Достоверность результатов исследований подтверждается также высокой степенью соответствия лабораторных и натурных испытаний. Согласно проведенному литературному обзору, полученные результаты не противоречат уже известным научным фактам.

Апробация работы

Результаты были представлены на всероссийских и международных конференциях: X Международного Российско-Казахстанского Симпозиума «Углекислотная и экология Кузбасса», посвященного 300-летию Кузбасса. 12-13 июля 2021 года в г. Кемерово, Всероссийская конференция с международным участием "Водород. Технологии. Будущее" 23-24 декабря 2020 года в г. Томск, Научно-практическая конференция «Угольная теплоэнергетика в Казахстане: проблемы, решения и перспективы развития» 27-28 февраля 2020 года в г. Нур-Султан.

Личный вклад автора

Автором сформулированы цель и задачи по проведению исследований, разработка методики и выбор аппаратного оснащения.

Синтезировано и реализовано схмотехническое и конструктивное исполнение схемы для измерения частичных разрядов в ископаемых твёрдых топливах при напряжениях промышленной частоты до 50 кВ.

Проведены экспериментальные исследования частичных разрядов и формирования проводящего канала в ископаемых твёрдых топливах при воздействии высокого напряжения промышленной частоты, электрофизической конверсии ископаемых твёрдых топлив в газообразные и жидкие продукты.

Осуществлена разработка, монтаж и пуско-наладка опытной полевой установки для исследования электрофизической конверсии ископаемых твёрдых топлив.

Проведены опытные полевые испытания электрофизической конверсии ископаемых твёрдых топлив.

Проведен анализ полученных результатов, сформулированы рекомендации по модернизации опытной полевой установки и основные выводы по работе.

Автором самостоятельно выдвинуты защищаемые научные положения. С непосредственным участием автора подготавливались научные статьи и выступления на конференциях.

Публикации

По теме диссертации включая статьи и тезисы докладов всероссийских и международных конференций опубликовано 28 печатных работ, из них 2 статьи в журналах из перечня ВАК, 3 статьи индексируемых в базах Web of Science и Scopus, в т.ч. 1 – 2 квартиля, 1 монография, 1 патент на изобретение и 1 патент на полезную модель.

Реализация и внедрение

Результаты диссертационных исследований внедрены в производственный процесс Экибастузского каменноугольного месторождения в границах разреза богатырь ТОО «Богатырь Комир», г. Экибастуз, Казахстан, что подтверждается соответствующим актом внедрения (Приложение Д).

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения, списка опубликованных работ по теме диссертации, списка использованной литературы и приложений. Материалы диссертации изложены на 134 страницах, содержат 38 рисунков и 16 таблиц. Список использованной литературы включает 68 наименований. В приложении приведены: дополнительный материал по микроскопии, дополнительные осциллограммы ЧР, патент, акт о внедрении результатов работы, эскизные схемы рекомендованные в рамках модернизации.

Содержание работы

Во введении приведены обоснование актуальности проводимых исследований, постановка цели и формулировка задач, положения, выносимые на защиту, новизна и практическая значимость диссертационной работы, краткий обзор содержания диссертации.

В первой главе приведен литературный обзор способов подземной разработки месторождений ископаемых твёрдых топлив, дано описание их достоинств и недостатков. Подробнее описаны существующие промышленные технологии подземной разработки ископаемых твёрдых топлив. Дана характеристика ископаемым твёрдым топливам как материалу, особое внимание уделено электрофизическим параметрам. Представлен обзор схмотехнических решений, применяемых для измерения параметров частичных разрядов. Описаны основные моменты применения проводящего канала для конверсии ископаемых твёрдых топлив.

Во второй главе описывается схмотехническое исполнение лабораторного комплекса для исследования электрофизической конверсии ископаемых твёрдых топлив, приведены его электрические параметры. Представлены характеристики серийных узлов и датчиков, применяемых в составе комплекса. Приведён расчёт общей нагрузочной характеристики силового оборудования.

В третьей главе представлены результаты и анализ аналитических исследований ископаемых твёрдых топлив, а именно микроскопия и элементный состав. Описаны и

проанализированы экспериментальные лабораторные исследования электрофизической конверсии ископаемых твёрдых топлив. В частности, эксперименты по инициации частичных разрядов, формированию проводящего канала и влиянию вводимой мощности на получаемые газообразные и жидкие продукты.

В четвертой главе приведены результаты полевых испытаний электрофизической конверсии ископаемых твёрдых топлив. Описаны испытательный полигон и опытная полевая установка. Приведены и проанализированы электрофизические параметры конверсии в процессе испытаний. Даны рекомендации по модернизации опытной установки.

В заключении приводятся основные выводы, полученные в результате выполнения диссертационной работы.

Глава 1. Подземная переработка ископаемых твёрдых топлив

1.1 Подземные способы разработки месторождений ископаемых твёрдых топлив

Предложено большое многообразие способов подземной переработки ИТТ непосредственно на месторождении. Их можно классифицировать по технологическому принципу на три основные группы:

1. Нагрев породы до температуры термической конверсии органической компоненты в жидкие и газообразные продукты;
2. Подача нагреваемого дутья, реагирующего с породой, с последующим сбором продуктов;
3. Разрушение (разрыхление) пласта, в том числе с использованием растворителей, и извлечение, уже находящихся в породе, органических компонент, в том числе легкорастворимых.

Методики, основанные на нагреве породы, представлены наиболее широким спектром вариантов. Отличия обусловлены только способами нагрева и сопутствующими технологическими операциями.

В основе дутьевых методов лежит подача дутья в пласт ИТТ отбор образовавшихся продуктов. По мимо воздействия на породу высокой температурой подаваемой среды, существенное влияние на процесс конверсии оказывают реакции дутья с породой. Соответственно на техпроцесс влияет и вид дутья. По существу, эта группа методик представлена ПГУ (UCG) с какими-то техническими вариациями. Различные виды дутья, режимы его подачи, конфигурация и конструкция скважин.

Группа методов разрушения породы представлена технологией ГРП (Hydrofrack). ГРП в свою очередь представляет собой объединение технологий направленного и горизонтального бурения и собственно гидравлического удара. Основные изыскания в этой области направлены на оптимизацию технологий бурения и составов гидравлических жидкостей.

В приведённой классификации первая группа представлена большим объёмом исследований, при этом вторая и третья представлены, по существу, одной технологией. Причина этой особенности заключается в том, что только ПГУ и ГРП достигли статуса полноценной технологии с мировым опытом промышленной эксплуатации. Соответственно стоит учитывать

данные полученные при эксплуатации ПГУ и ГРП. Далее каждая группа будет рассмотрена подробнее, ПГУ и ГРП будут рассматриваться в качестве основы мирового технологического опыта в области альтернативных способов подземной разработки ИТТ.

1.1.1 Подземная термическая конверсия ископаемых твёрдых топлив

Термическая конверсия ископаемых твердых топлив заключается в нагреве пласта до температуры термодеструкции, как правило, не ниже 450 °С в условиях недостатка или практически полного отсутствия кислорода. Повышение температуры приводит к десорбции газообразных и легколетучих компонент и разложению сложных органических соединений, находящихся в твердой фазе, на более простые жидкие и газообразные. На сегодняшний день предложено огромное количество различных способов нагрева твердых топлив [1-3], в частности горючих сланцев, непосредственно на месторождении. Их можно разделить на две большие группы: нагрев от источника тепла за счёт теплопроводности и нагрев за счёт воздействия ВЧ электромагнитного поля.

Высокочастотный нагрев

ВЧ или индукционный нагрев связан с диэлектрическими потерями в пласте при приложении к нему ВЧ электромагнитного поля [4-6]. Один из ключевых нюансов таких способов – доставка ВЧ поля на глубину. Даже в специализированных волноводах существует затухание электромагнитных волн, соответственно часть энергии рассеивается при её транспортировке. Так же важно максимально эффективно передать энергию от волновода в породу. С этим связаны изыскания в области электродных систем нацеленные на минимизацию потерь энергии на сопряжении электрода с пластом. Учитывая низкую проникающую способность ВЧ поля в породу такой способ нагрева позволяет прогреть до десяти метров приэлектродной области. Большой объём прогревается за счёт теплопроводности породы, которая невысока. При этом межскважинное расстояние должно удовлетворять требованиям рентабельности, т.к. процесс бурения достаточно затратен. Учитывая эти обстоятельства предлагаемые способы ВЧ нагрева рассчитаны на прогрев пласта в течение нескольких лет до выхода на номинальный расчётный дебет. Увеличить эффективность ВЧ нагрева можно поднимая частоту или напряжение. Однако с ростом частоты увеличиваются и потери в системе транспортировки электромагнитного поля, а существенное повышение напряжения требует высокой электрической прочности изоляции.

Способы, основанные на теплопроводности

Нагрев осуществляется за счёт помещённых в пласт источников тепла [7-12]. Этот раздел представлен более широким спектром различных способов нагрева. Их объединяет и одновременно отличает от ВЧ нагрева то, что на стадии конверсии основные задачи лежат в области тепломассопереноса, на стадии доставки тепла до пласта всё сводится к инженерно-техническим изысканиям.

Один из способов нагрева породы осуществляется посредством сжигания в скважине или сбойке скважин топливно-окислительной смеси. Возможны вариации с непосредственным контактом пламени и породы или вариации, например, со стальной трубой, установленной в пласте, в которой происходит горение.

Так же для нагрева можно использовать сам пласт твердого топлива. В пласт подаётся окислительная смесь и производится поджиг. Происходит частичное окисление и выделенное тепло приводит к конверсии, оставшейся неокисленной породы.

Возможен вариант нагрева за счет джоулева тепла в резистивном элементе, находящимся в скважине или сбойке скважин по существу отличаются нагревателями и методами их интеграции в пласт. Использование резистора для этих целей – наиболее очевидно. Под резистором понимается некоторая конструкция с заданным сопротивлением. Наиболее масштабные испытания такого способа, как и в целом способов, основанных на нагреве проведены компанией ExxonMobil [13,14]. Однако информация о внедрении этой или другой технологии нагрева в промышленном масштабе отсутствует.

1.1.2 Дутьевые технологии разработки месторождений ископаемых твёрдых топлив

В основе дутьевых способов подземной конверсии, или газификации, ископаемых твердых топлив лежит нагнетание в пласт породы окислительно-восстановительной газовой смеси, как правило, воздух с паром, частичное окисление исходного сырья и термохимическая реакция восстановительных компонент с коксовым и полукоксовым остатком. Наиболее обширные исследования и систематизация мирового опыта ПГУ, в течении нескольких десятков лет, принадлежат Крейнину Е.В. [15], стоявшему у истоков этой технологии.

До конца второй мировой войны разработки в области дутьевой газификации велись только в СССР, и целевым сырьем был уголь. Первое авторское свидетельство на один из таких

способов было заявлено в 1930 г [16]. В течение нескольких последующих лет предлагались различные технологические решения [17-19]. В большинстве случаев подразумевалось осуществление подземных работ и по существу отличия заключались только в методах разрыхления пласта, что само по себе заведомо малоэффективно. Один из них предусматривал закладку зарядов взрывчатых веществ в пласт угля и инициацию взрыва с поверхности (метод проф. Федорова), другие автоматическое взрывание зарядов по мере продвижения фронта высоких температур в пласте и выгазовывания угля (метод инж. Кириченко), некоторые заключались в обычном извлечении угля из пласта, последующем его дроблении, пересортировке под землей, и дальнейшей закладке его в полученные выработки и конверсии (метод магазинирования инж. Кузнецова). В конце 1934 года был предложен метод «потока», или метод Донецкого углехимического института (ДУХИ). «Поток» базировался на новых технологических принципах газификации угля исключая искусственное дробление. Процесс газификации по методу «потока» протекает в реакционном канале пласта, имеющем три стороны, образованные почвой, кровлей пласта и обрушаемой породой, четвертой стороной была раскаленная поверхность угля. Дутье, подаваемое в начало канала, сжигает летучие вещества угля и углерод, образуя продукты горения, то есть диоксид углерода и водяные пары. Эти продукты реагируют с углеродом, содержащимся в коксовом остатке, и превращаются в горючие компоненты (CO , H_2 , CH_4) и выходят с другой стороны канала на поверхность. В результате метод «потока» осуществили бесшахтным способом без проведения подземных работ. На рисунке 1 изображена схема традиционного подземного газогенератора на наклонных угольных пластах.

Однако, эта технология обладала рядом недостатков. В 1980-1990-х гг. были предложены решения по их устранению, что привело к появлению новой технологии ПГУ (Рис. 2). По существу, методика подземной газификации не изменилась, а были применены более совершенные технологические решения.

Промышленные разработки угля методом ПГУ производились в СССР до 1996 г., однако подземная газификация оказалась экономически нецелесообразной на фоне больших запасов природных газа и нефти.

В качестве дутья использовались: воздух; паровоздушная смесь; воздух, обогащенный кислородом; технически чистый кислород. В связи с чрезвычайно высокой опасностью возникновения аварийных ситуаций, основные результаты получены для воздушного и паровоздушного дутья.

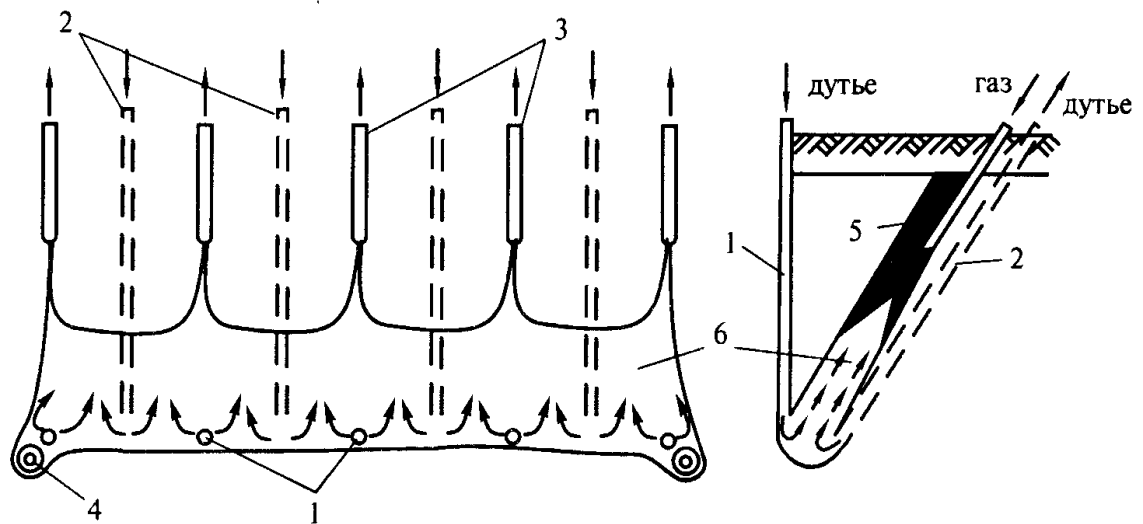


Рисунок 1 – Схематичное изображение традиционного подземного газогенератора на наклонных угольных пластах: 1 – вертикальные дутьевые скважины; 2 – наклонные дутьевые скважины; 3 – наклонные газоотводящие скважины; 4 – вертикальные водоотливные скважины; 5 – угольный пласт; 6 – пространство, подвергшееся газификации.

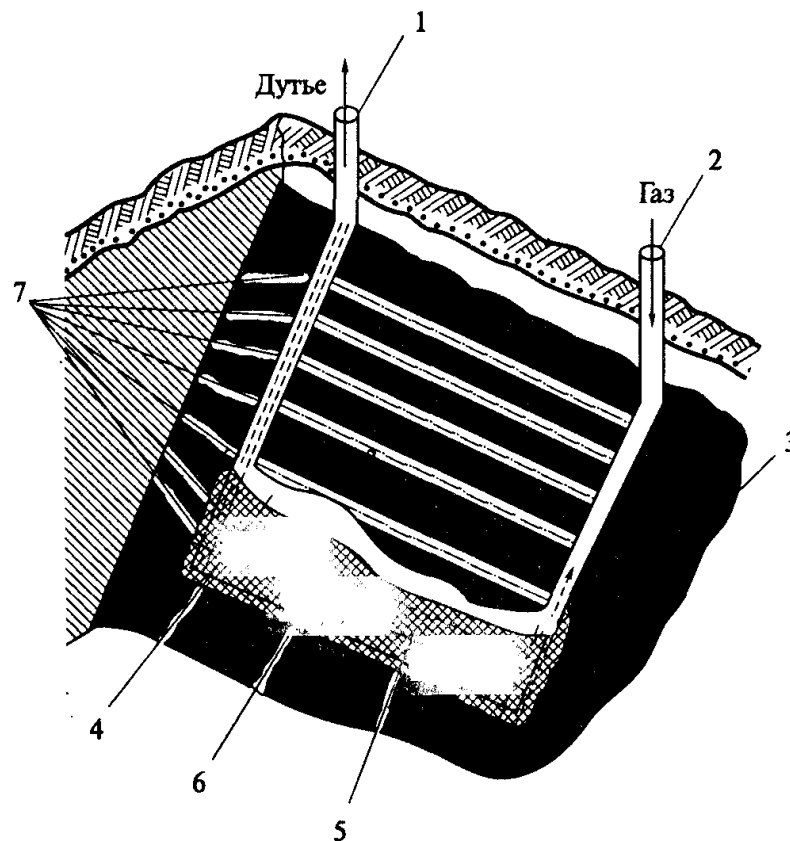


Рисунок 2 – Схематичное изображение модуля подземного газогенератора по новой технологии: 1 – дутьевая скважина, обсаженная по угольному пласту; 2 – газоотводящая скважина без обсадки по угольному пласту; 3 – угольный пласт; 4 – реакционный канал; 5 – обрушившаяся порода кровли и шлак; 6 – изначальный канал газификации; 7 – подводы переноса подачи дутья.

Основные результаты ПГУ на Южно-Абинской станции «Поземгаз» за 1956-1991 гг. приведены в таблицах 1, 2, 3, 4.

Таблица 1 – Результаты ПГУ на Южно-Абинской станции «Поземгаз» за 1956-1991 гг.

Глубина подземного газогенератора, м	Мощность угольного пласта, м	Промышленные запасы, тыс. т	Выгазовано угля		Получено газа, млрд м ³	Утечки газа, %
			тыс. т	%		
50	8-9	22,4	15,43	68,9	0,0554	27,0
145	8-9	401,21	355,48	88,9	1,2718	21,3
200	-	1134,23	776,47	68,5	3,0793	15,0
300	-	544,4	280,65	51,6	1,2577	9,6
230	3,8	594,5	582,76	98,0	2,6773	13,4
134	2,2	221,07	166,54	75,3	0,707	12,1
300	3,0	66,0	69,8	106,0	0,294	8,9

Таблица 2 – Состав газа ПГУ на Южно-Абинской станции «Поземгаз» за 1956-1991 гг.

Содержание компонент, об. %							
H ₂ S	CO ₂	C _n H _m	O ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂
9	10	11	12	13	14	15	16
0,01	7,94	0,1	0,2	20,8	15,2	2,43	53,32
0,03	12,32	0,22	0,2	12,88	14,28	3,63	56,44
0,03	13,83	0,32	0,2	10,94	16,06	2,98	55,64
0,02	15,13	0,2	0,2	8,91	15,62	2,83	57,09
0,02	14,1	0,23	0,2	10,54	13,6	2,12	59,19
0,02	14,5	0,23	0,2	10,8	11,65	1,96	60,64
0,06	15,74	0,2	0,2	8,94	13,49	1,93	59,46

Таблица 3 – Результирующие параметры ПГУ на Южно-Абинской станции «Поземгаз» за 1956-1991 гг.

Теплота сгорания газа, МДж/м ³ (ккал/м ³)	КПД газификации, %	Удельный выход газа, м ³ /кг угля	Удельный расход дутья, м ³ /м ³
17	18	19	20
4,84 (1157)	61,6	3,5	0,83
4,30 (1027)	55,9	3,6	0,94
4,09 (977)	59,6	4,0	0,86
3,68 (880)	60,7	4,5	0,82
3,45 (825)	55,0	4,6	0,88
3,24 (773)	49,5	4,2	0,89
3,18 (760)	51,5	4,6	0,84

Зарубежный опыт по подземной газификации углей (ПГУ) берет свое начало в 1946 г. в США. В течение нескольких десятилетий испытания ПГУ проводились во Франции, Бельгии, ФРГ, Великобритании, Нидерландах. По сути, эти работы были лишь испытаниями подземной газификации в естественных условиях, исключениями стали только Китай и Австралия. В 2003

году в Китае находилось 6 опытных подземных газогенераторов. Особое внимание стоит обратить на австралийский коммерческий проект (г. Чинчилл) предприятия «ПГУ-ТЭС». Суммарная электрическая мощность используемого цикла 67 МВт. Экспериментальные работы проводились с 1999 по 2013 гг. [20] Основные результаты зарубежного опыта по опытно-промышленным испытаниям приведены в таблице 5.

Таблица 4 – Сравнительные параметры старой и новой технологии ПГУ.

№ п/п	Параметры	Ед. измер.	Технология ПГУ	
			старая	новая
1	Тепловая мощность газогенератора	ГДж/ч Гкал/ч	167 40	167 40
2	Количество дутьевых скважин	шт.	16 (32)	3
3	Количество газоотводящих скважин	шт.	11	4
4	Ср. дебит дутьевой скважины	м ³ /ч	3560	12250
5	Ср. дебит газоотводящей скважины	м ³ /ч	4680	10300
6	Давление на головках газоотводящих скважин	Мпа	0,15	0,15
7	Влажность газа	г/м ³	600	200
8	Теплота сгорания газа	ккал/м ³ МДж/м ³	800 3,5	1000 4,19
9	Степень извлечения угля	%	80	90
10	Утечки газа	%	15	10

Таблица 5 – Состав и калорийность газов, получаемых газификацией углей при различных условиях.

Параметры	Подземная газификация		Наземная газификация (после очистки)
	Сев. Испания	США	
Рабочее давление, МПа	5,3	0,4	2,5
Состав газа, %			
CO ₂	41,0	34,9	3,87
CO	12,8	20,8	60,51
H ₂	24,8	38,1	22,08
CH ₄	13,2	4,7	0,01
H ₂ S	7,9	1,5	0,00
N ₂	-	-	13,53
Теплота сгорания (нижний предел), кДж/	10900	8730	10030

Представленные результаты зарубежного опыта ПГУ основываются на наиболее успешных попытках освоения ПГУ. При этом в качестве дутья использовался технически чистый (95÷97 %) кислород, что обуславливает достаточно высокие показатели, особенно по теплотворной способности. Так же существенный прирост содержания метана и, как следствие, теплотворной способности был получен за счёт кратного повышения давления, что в свою очередь негативно сказывается на безопасности и издержках метода. Однако испытания привели к серьёзным аварийным последствиям и работы по ПГУ прекратили.

В качестве неординарного решения можно рассмотреть растворение керогена сверхкритическими флюидами [21]. Однако это только лабораторные исследования, очевидно в полевых условиях транспортировка флюидов в сверхкритическом состоянии с его сохранением на протяжении всего тракта экстракции будет весьма затруднительно и затратно.

Ключевые особенности технологии ПГУ:

- большое количество вертикальных скважин, находящихся в зоне активных деформаций кровли газифицируемого угольного пласта, как следствие, имеющих сокращенный эксплуатационный ресурс;
- невысокая интенсивность технологического процесса, во-первых, из-за ограниченности газоотводящих каналов (отношение количества газоотводящих каналов к количеству дутьевых составляет не более 0,3-0,4), во-вторых, из-за отсутствия охлаждающих устройств в газоотводящих скважинах;
- КПД процесса газификации не более 60 %;
- завершающей реакцией в процессе газообразования является реакция конверсии монооксида углерода водяным паром ($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$), что обусловлено большей длиной тракта газа (после зон газификации) при температуре $800 \div 600^\circ\text{C}$;
- особенности газообразования в реакционной зоне определяют стабильность и специфику состава, и калорийность газа, получаемого с помощью ПГУ ($\text{CO}_2 \sim 20$; $\text{CO} \sim 3$; $\text{H}_2 \sim 22$; $\text{CH}_4 \sim 3,5$; $\text{N}_2 \sim 51,5$ %; $Q_p^H \approx 4,0 \text{ МДж/м}^3$)

Не смотря на большой опыт внедрения ПГУ исследования, в том числе полевые, в этой области не прекращаются [22,23]. ПГУ обладает существенным технологическим потенциалом для внедрения, но остаётся альтернативной технологией разработки месторождений твердых топлив. Это происходит по ряду причин на фоне более рентабельных традиционных технологий разработки ИТТ в совокупности с наличием более технологически привлекательной энергетической и химической сырьевой базы в виде природных газа и нефти. К основным причинам, относящимся непосредственно к ПГУ, можно отнести КПД, большое содержание балластного газа и, как одно из ключевых следствий, низкую теплотворную способность конечного газа, низкую управляемость процессом.

1.1.3 Применение гидравлического разрыва пласта для разработки месторождений ископаемых твёрдых топлив

Направленное горизонтальное бурение и гидравлический разрыв пласта (ГРП) твердого топлива известны уже долгое время. Эти технологии использовались при осуществлении ПГУ в СССР и Испании, а также в США для добычи газа и нефти с конца 1940-х годов [15]. Эксперименты по применению ГРП с целью извлечения газообразных и жидких фракций органической компоненты горючих сланцев [24-26] началось приблизительно в 1996 г. С некоторыми технологическими усовершенствованиями, в основном касающимися состава гидравлической жидкости, полномасштабное внедрение ГРП на территории США началось в 2007-2009 гг.

Суть технологии заключается в создании системы глухих тоннелей, имеющих одно устье, заполнении полученного куста гидравлическим составом и осуществлении гидроудара. На рисунке 3 приведены схемы образования трещин гидравлического разрыва в массиве горных пород. Таким образом происходит разрыхление породы, вскрытие микроколлекторов и выход газообразных и жидких продуктов. Для сохранения высокой проницаемости породы в гидросоставе присутствует расклинивающий агент (пропанд), как правило, кварцевый песок. В современной технологии ГРП, используемой компаниями США, применяется гидравлическая жидкость с большим числом компонент, в том числе кислот для дополнительного увеличения проницаемости и выхода легкорастворимых компонент органической части сланцев. В каждую скважину под давлением подается в среднем 20 млн. литров воды в смеси с большим количеством песка или другого пропанда с добавлением 200 тыс. литров кислот, биоцидов, ингибиторов образования отложений, редукторов трения и поверхностно-активных веществ. На площади 2 га бурится до 16 скважин с помощью которых ГРП подвергается до 1,5 кв.км пласта с использованием 300 млн. и более литров воды с добавками.

Конверсии органической компоненты горючих сланцев при ГРП не происходит, осуществляется лишь извлечение жидких и, в основном, газообразных углеводородов, образовавшихся в сланцевой толще в процессе метаморфизма. С этим также связано типичное снижение дебета на 80÷95 % в первые три года и на 30÷50 % каждый год эксплуатации без бурения дополнительных скважин. Не смотря на низкую степень извлечения топливно-энергетического потенциала и существенные вложения в поддержание дебета (3÷6 млн. долл. на скважину), комбинация горизонтального бурения и гидроразрыва пласта показала высокую результативность по опыту США. На 2012 г. 40 % добываемого в США газа приходится на сланцевый.

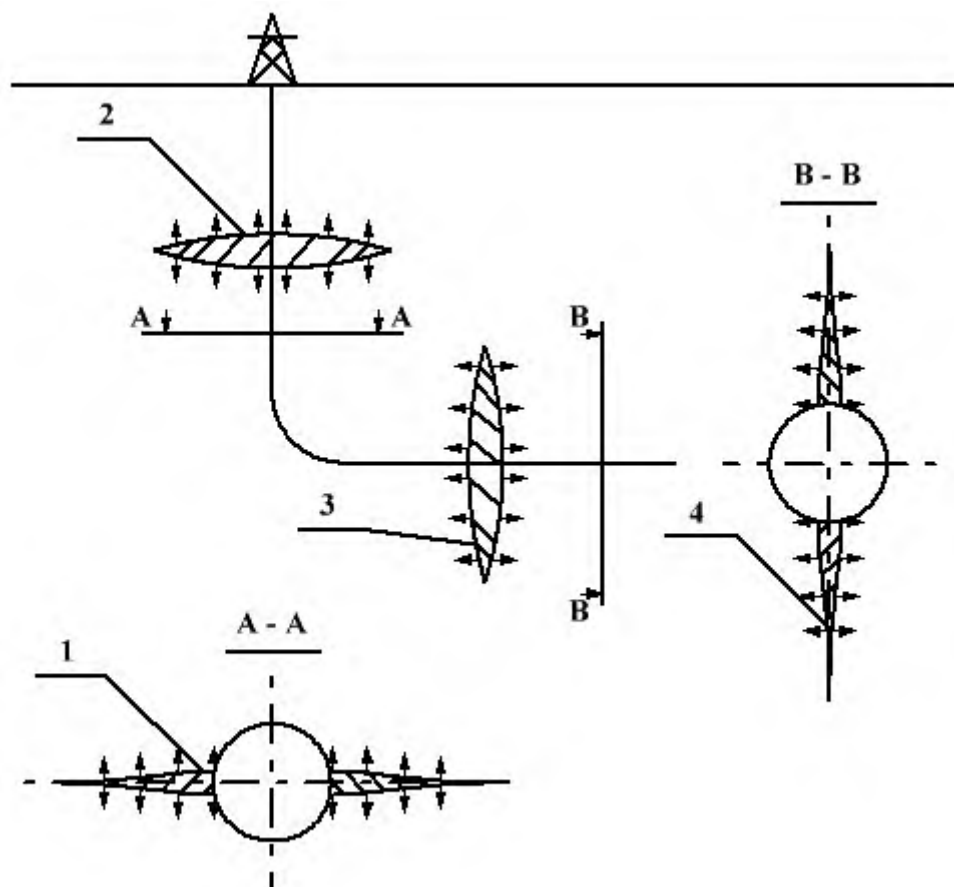


Рисунок 3 – Схемы образования трещин гидравлического разрыва в массиве горных пород на вертикальном участке ствола скважины 1, 2 и на горизонтальном участке ствола скважины 3, 4:

1 – горизонтальная трещина; 2 – горизонтальная дискообразная трещина; 3 – вертикальная трещина; 4 – вертикальная дискообразная трещина [27].

Попытки внедрить ГРП в мировую практику не увенчались успехом. На сегодняшний день не существует единого и однозначного мнения по поводу экологической безопасности, эффективности и экономической рентабельности применения гидравлического разрыва с целью разработки сланцевых месторождений. Помимо этого, ГРП ограничен в универсальности по ряду причин. Экологические риски связаны с загрязнением грунтовых вод и почвы разрабатываемых участков метаном и добавками гидравлической жидкости. Это может быть вызвано аварийными ситуациями, которые возможны при использовании любого другого метода. Однако ГРП применяется для глубокозалегающих пластов (от 1000 м), что увеличивает возможность ошибки в расчёте траектории горизонтальных скважин, а, следовательно, вероятность аварии. Эффективное и рентабельное применение ГРП возможно на пластах, обладающих большой мощностью, от (7÷10) м [13] и высокой степенью метаморфизма. Таким образом, ГРП применяется для весьма ценных в связи с мощностью и составом пластов, нерентабельных для более эффективных технологий, из-за больших глубин залегания.

1.2 Характеризация ископаемых твёрдых топлив

1.2.1 Ископаемые твёрдые топлива как гетерогенный материал

Ископаемые твёрдые топлива – горные породы осадочного генезиса с различной степенью метаморфизма и соотношением органической и минеральной компонент. ИТТ представлены следующими основными типами: торф, горючие сланцы, угли. Из-за осадочного генезиса ископаемые твердые топлива обладают ярко выраженной гетерогенностью и анизотропией. Для этих пород характерна слоистость различной степени. Содержание органической компоненты варьируется в весьма широких пределах 5÷85 %. Остальная часть – минеральная компонента, дающая зольный остаток при сжигании. Присутствует пористость и трещиноватость на микро и наноуровне, в естественных условиях эти полости заполнены флюидами (газом или жидкостями).

Минеральная компонента состоит из обломочного материала, наносных пород и метаморфизированных отложений. В основном это: кварц, силикаты и алюмосиликаты (слюды, полевые шпаты, глины и т.д.), карбонаты (кальцит, магнезит, сидерит, доломит и т.д.), сульфиды (в основном пирит, но также марказит, халькопирит и др.). В таблице 6 [28] представлены результаты рентгенофазового анализа горючих сланцев Хуадяньского месторождения, которые наглядно показывают состав минеральной компоненты ИТТ на частном примере.

Таблица 6 – Результаты рентгенофазового анализа горючих сланцев Хуадяньского месторождения [28].

Образец	Глубина (м)	Дебет смолы (%)	Пласт горючего сланца №	Обломочный материал (%)				Карбонаты (%)		Глины (%)				Прочие (%)		
				Крц	Щпш	Пл	Сум	Кал	Сум	Сме	Илл	Клн	Сум	Пир	Сд	Сум
Горючий сланец высокого качества																
2	255,0	12,4	3	33	4	0	37	28	28	31	0	0	31	4	0	4
Горючий сланец обычного качества																
4	259,0	8,1	4	32	3	3	38	19	19	25	0	11	36	2	5	7
5	259,8	8,1	4	34	0	0	34	30	30	23	8	0	31	5	0	5
3	258,0	6,6	4	42	2	23	46	17	17	34	0	0	34	3	0	3
6	266,3	5,1	5	32	3	0	35	8	8	25	17	10	52	5	0	5
15	338,2	5,0	11	40	5	5	50	8	8	33	0	7	40	2	0	5
Горючий сланец низкого качества																
23	345,7	4,1	12	45	2	2	49	0	0	49	0	0	49	2	0	2

Крц. – кварц; Щпш. – щелочные полевые шпаты; Пл. – плагиоклаз; Кал. – кальцит; Сме. – смектит; Илл. – иллит; Клн. – каолинит; Пир. – пирит; Сд. – сидерит; Сум. – суммарно.

Органическое вещество в твердых горючих ископаемых представляет собой метаморфизированные остатки растительности, микроорганизмов и, в некоторых случаях, планктона. Органические компоненты различных топлив классифицируются по исходному генетическому материалу и условиям диагенеза. Угли делятся на две большие группы: гумусовые и сапропелитовые. При этом в процессе метаморфизма образуются следующие типы органических веществ углей: витрен, фюзен, кларен, дюрен. Формула органического вещества углей, построенная с учётом наибольшего количества физических, физико-химических и химических данных: $C_{135}H_{96}O_9NS$ [29]. Несмотря на приведённую теоретическую формулу стоит учитывать, что органическое вещество ИТТ не имеет строго регулярного строения. То есть макромолекулы включают в себя в некоторой степени упорядоченное, регулярное ядро с присоединёнными неупорядоченными, нерегулярными и, в некотором количестве, гетероатомными группами.

Основная масса органической компоненты горючих сланцев представлена керогеном. Кероген – высокомолекулярное и весьма устойчивое, в т.ч. к растворителям, полимерное соединение. Более простые по составу и текучие компоненты органического вещества горючих сланцев в виде флюидов скапливаются в нефтяных и газовых коллекторах в процессе метаморфизма. Кероген имеет весьма сложный химический состав, зависящий от исходного материала и условий диагенеза. Представляет собой полимер нерегулярного строения с высокой молекулярной массой и сложной структурой молекул. В качестве примера приведены эмпирические формулы керогена [30-32]: $C_{99}H_{89}N_2SO_9$, $C_{421}H_{638}O_{44}S_4NCl$, $C_{102}H_{78}O_{10}N_2$. Они отражают только приблизительное молекулярное соотношение, но не структуру вещества.

Одной из основополагающих характеристик органического вещества горючих полезных ископаемых в целом и ИТТ в частности являются атомарные соотношения водорода и кислорода к углероду H/C и O/C соответственно. Эти соотношения определяются исходным сырьём и условиями диагенеза. В тоже время H/C и O/C имеют влияние на процесс метаморфизма и определяют технико-технологические характеристики извлекаемого сырья. Типизация органического вещества ИТТ основывается на этих соотношениях. На рисунке 4 представлен общий классификационный график горючих ископаемых в тройной системе координат (C; H; O) при выражении состава топлива в атомных процентах.

Характеристики породы могут сильно отличаться, даже в границах одного месторождения, особенно на разных слоях. Более того образцы целиков, подготовленные из одного куска породы, имеют существенные различия в свойствах, таких как теплопроводность, электропроводность и т.д. Данные полученные для целиков позволяют сделать только качественную оценку количественных показателей тех или иных характеристик. При этом стоит учитывать, что даже

минимальная механическая обработка при подготовке образцов, а также длительность хранения породы на воздухе существенным образом влияет на результаты измерения. Для определения интегральных характеристик ИТТ приведенных к какому-то усреднённому значению в подавляющем большинстве случаев используют измельченные гомогенизированные перемешиванием образцы [29].

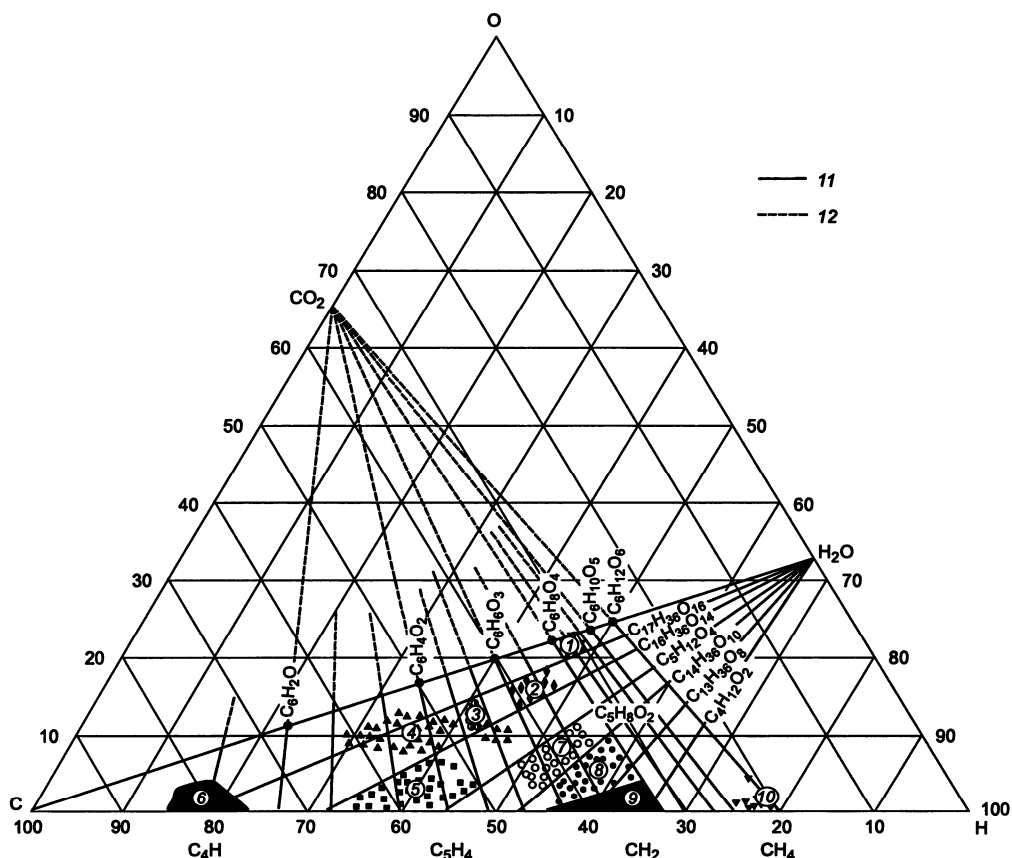


Рисунок 4 – Классификационный график горючих ископаемых в тройной системе координат при выражении состава топлива в атомных процентах [30]: 1 – растительное вещество; 2 – торф; 3 – лигниты; 4 – бурый и 5 – каменный уголь; 6 – антрацит; 7 – сланцы и сапропелиты; 8 – сланцы и ископаемые смолы; 9 – нефть; 10 – природные газы; линии: дегидратации (11), декарбоксилирования (12).

В качестве наглядного примера стохастического характера структуры ИТТ приведены фотография глиняного фрагмента сланцевого месторождения и распределение в нём пор и пирита, полученное с помощью томографа (рис. 5) [33].

Аналогично стохастический характер имеют размеры, распределение и форма пор. На рисунках 6 [34] и 7 [35], на примере горючих сланцев месторождения Вудфорд (США) и Барнетт (США), соответственно, наглядно показано, что размер пор в ИТТ может варьироваться от

единиц до нескольких сотен нанометров. При этом форма пор и их поверхностей весьма разнообразна и неоднородна.

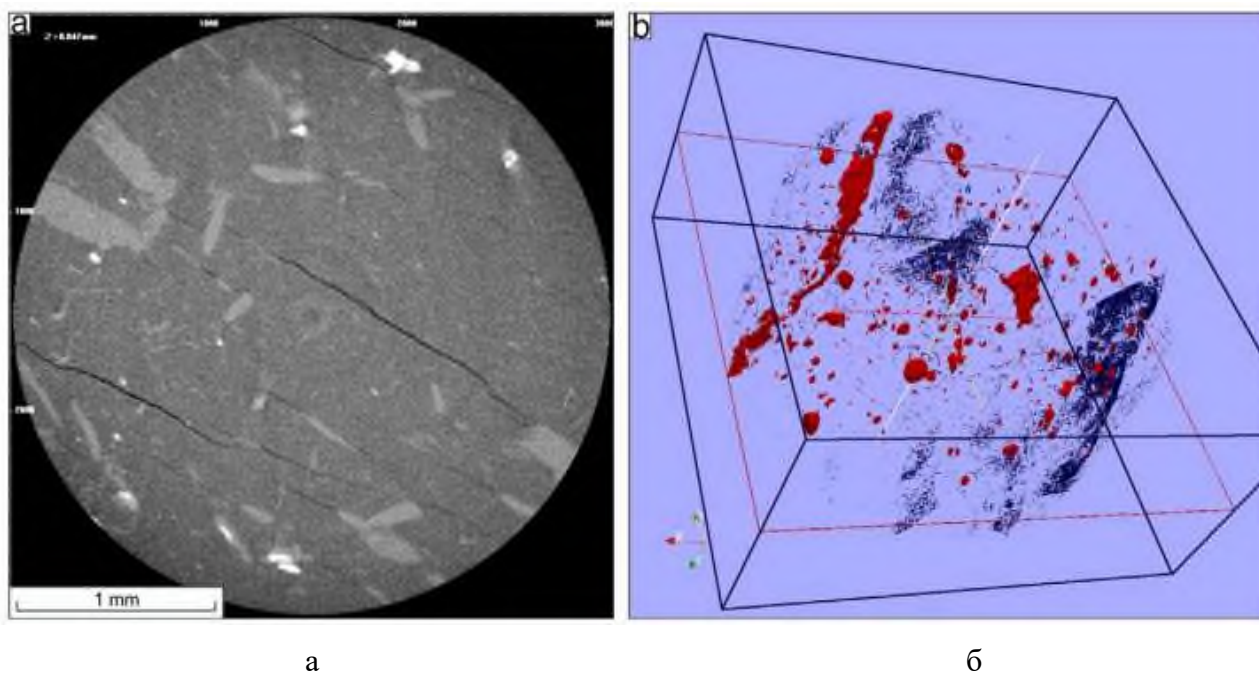


Рисунок 5 – Фотография образца горючих сланцев диаметром 3 мм (а) и трехмерное распределение пирита (красный) и пор (синий) в образце (б).

Ископаемые твердые топлива представляют собой очень гетерогенный материал, поэтому подвергнуть ИТТ какой-либо общей и в тоже время строгой классификации не представляется возможным. В целом вопросу классификации ИТТ посвящено множество работ. Однозначно можно выделить ключевое влияние на отнесение породы к какому-либо классу исходного материала: древесина и высшие растения или сапропель. Наиболее широкое распространение в качестве топливно-энергетического и химико-технологического сырья получили угли. Поэтому наиболее употребляемые классификации строятся на их физических и технологических характеристиках. Угли делят на бурые, каменные и антрациты. При этом выделяют сапропелевые угли, которые, в случае высокой зольности или на ранней степени метаморфизма, относят к горючим сланцам. Также угли делят по маркам: бурые, длиннопламенные, газовые, жирные, коксовые, отощенно-спекающиеся, тощие, антрациты. При необходимости вводят промежуточные марки [36].

Отдельным классом можно выделить низкосортные ИТТ. К НИТТ относятся, торф, горючие сланцы, некоторые виды, молодые или высокозольные, бурых углей. Низкосортными они называются вследствие высокой зольности и влажности, низкой теплотворной способности и т.д. То есть НИТТ по совокупности различных причин непригодны для рентабельной утилизации в рамках общепринятых и наиболее распространённых технологических процессов.

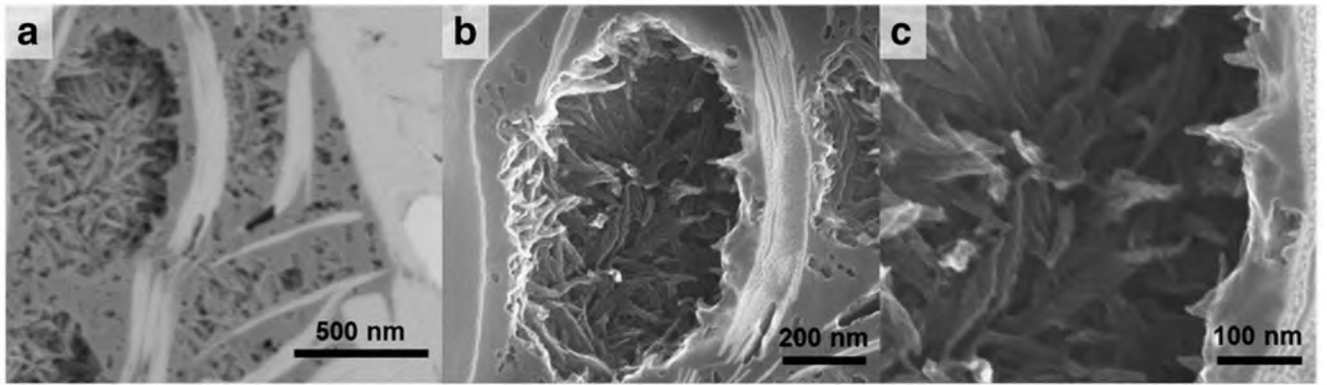


Рисунок 6 – Микрофотография пор в горючих сланцах месторождения Вудфорд (США) при различном увеличении.

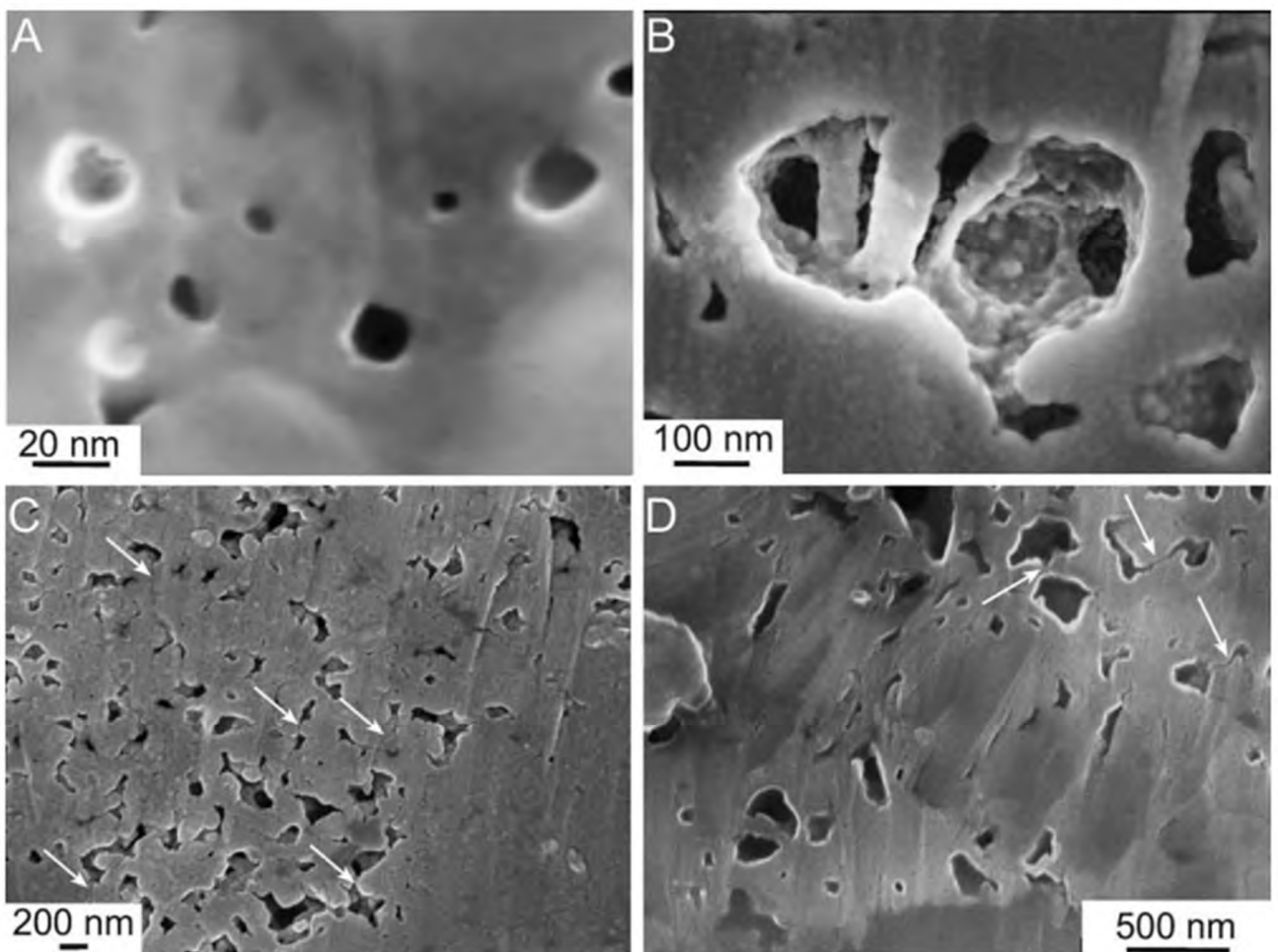


Рисунок 7 – Микрофотография пор в горючих сланцах месторождения Барнетт (США) при различном увеличении.

Опираясь на тип и марку ИТТ можно сделать весьма опосредованные выводы касательно состава и каких-либо свойств породы, как материала. Также для такого рода косвенной оценки стоит учитывать некоторые характеристики ИТТ:

Спекаемость – способность перехода угля в пластическое состояние под действием высоких температур в бескислородной среде. Угли с высокой спекаемостью образуют монолит после остывания. Этот параметр зависит от содержания кислорода в исходной породе и типа органического вещества ИТТ.

Выход летучих веществ – количество соединений, которые образуются при нагревании угля до 850°C в безвоздушной среде, при этом не учитывается испаряющаяся влага. Зависит от соотношений H/C и O/C , которые в свою очередь зависят от степени метаморфизма. Таким образом для торфа или молодого сапропеля выход летучих максимальный, а для антрацита – минимальный.

Зольность – количество золы, оставшейся после сжигания, т.е. содержание минеральной компоненты в ИТТ с учётом термохимических превращений в процессе сжигания.

Влажность – количество сорбированной влаги без учёта гидратной, которая входит в состав минеральной компоненты. В отличие от гидратной сорбированная влага непосредственным образом участвует в физических процессах, происходящих в ИТТ.

1.2.2 Электрофизические свойства ископаемых твёрдых топлив

ИТТ представляет собой комплекс весьма разнородных материалов разных типов и классов, присутствующих в различных концентрациях и обладающих резкими различиями электрофизических свойств. Интегральные параметры, например, проводимость, диэлектрическая проницаемость и т.д., определяются параметрами каждого компонента и их соотношением. Далее в качестве основных электрофизических свойств будут рассмотрены проводимость, диэлектрическая проницаемость и пробивное напряжение.

Органическая компонента ИТТ различных типов является нерегулярным полимером. Как любой полимер, сам по себе обладает весьма низкой проводимостью. За счёт весьма сложной структуры и конфигурации молекул и присутствия гидроксильных и карбоксильных групп может иметь высокий дипольный момент и, соответственно, высокую локальную диэлектрическую проницаемость. При увеличении степени метаморфизма и, соответственно, углефикации электрическое сопротивление падает. Так, например, от длиннопламенного угля до тощего происходит снижение сопротивления до 4 порядков и может достигать удельных величин 10^6 ом·см при заданных условиях измерений. В этой области сопротивление падает не только и не столько из-за увеличения концентрации углерода. Основное влияние оказывает

упорядочивание структуры органического вещества, но при снижении выхода летучих за счёт снижения концентрации гетероатомных соединений. На стадии перехода от тощего к полуантрациту наблюдается более резкое снижение сопротивления до 7 порядков и для антрацитов наивысшего качества, т.е. наибольшей степени метаморфизма, достигает единиц ом·см. На этой стадии более существенную роль играет концентрация углерода в органическом веществе. Такие зависимости справедливы для гумусовых углей, т.к. с увеличением их степени метаморфизма соотношения H/C и O/C стремятся к нулю. Сапропелиты же на высокой стадии метаморфизма превращаются в нефть и природный газ. Их сопротивление растёт, т.к. концентрация углерода не увеличивается, а молекулярная структура сохраняет характер углеводородных полимеров.

Органическая составляющая ИТТ не имеет строго определённого состава и упорядоченной структуры, но интегрально может рассматриваться как некий нерегулярный высокомолекулярный полимер с гетероатомными примесями. Минеральная часть ИТТ содержит множество различных материалов с весьма широким спектром электрофизических свойств. Поэтому необходимо рассмотреть компоненты слагающие минеральную компоненту породы. Осадочные породы характеризуются высоким содержанием породообразующих минералов из класса силикатов (в том числе кремнезём), алюмосиликатов, карбонатов. Базовые компоненты, присутствующие в минеральной части ИТТ в больших количествах и различных пропорциях [36]: кварц, силикаты и алюмосиликаты (слюды, полевые шпаты, глины и т.д.), карбонаты (кальцит, магнезит, сидерит, доломит и т.д.), сульфиды (в основном пирит, но также марказит, халькопирит и др.). Диапазоны количественных значений сопротивления некоторых горных пород и минералов указаны в таблице 7 и на рисунке 8, диэлектрической проницаемости в таблице 8.

Кварц (кремнезем) и полевые шпаты – минеральный диэлектрик, с низкой диэлектрической проницаемостью. Сам по себе не обладает ярко выраженными специфическими электрофизическими свойствами. Однако кварц в присутствии воды с растворёнными ионами может создавать жидкий диффузный слой с избыточным положительным зарядом [38].

Глины – минералы из класса алюмосиликатов. Относятся к слабопроводящим материалам, глинистые частицы имеют поверхностный заряд вследствие специфики строения. Из-за гетеровалентного изоморфизма в глинистых минералах часто происходит потеря электронейтральности [39, 40]. Глины обладают повышенной диэлектрической проницаемостью, в том числе из-за высокой сорбционной способности по отношению к воде и катионам металлов. В целом наличие глин в составе ИТТ качественно и количественно влияет на микроструктуру породы, в т.ч. в процессе диагенеза. Из-за чего наблюдается зависимость макрохарактеристик

(хрупкость, пористость, текстура и т.д.) от концентрации глинистых минералов в минеральной компоненте ИТТ, с учётом типа глин [33].

Таблица 7 – Сопротивление горных пород и минералов [37].

Ангидрит	$10^7 \div 10^{10}$
Галенит	$10^{-5} \div 10^{-3}$
Галит	$10^{12} \div 10^{14}$
Гематит (железный блеск)	$10^{-2} \div 10^{-1}$
Графит	$10^{-6} \div 10^{-4}$
Кальцит	$10^7 \div 10^{12}$
Каменная соль	$10^{14} \div 10^{15}$
Кварц	$10^9 \div 10^{14}$
Лимонит	$10^6 \div 10^8$
Магнетит	$10^{-2} \div 10^{-1}$
Марказит	$10^{-2} \div 10^{-1}$
Молибденит	$10^{-3} \div 10^{-1}$
Мусковит	$10^{-1} \div 10^1$
Нефть	$10^9 \div 10^{16}$
Пирит	$10^{-4} \div 10^{-1}$
Пирролюзит	$10^0 \div 10^1$
Пирротин	$10^{-5} \div 10^{-4}$
Полевой шпат	$10^{11} \div 10^{12}$
Сера	$10^{12} \div 10^{15}$
Сидерит	$10^1 \div 10^3$
Сильвин	$10^{13} \div 10^{15}$
Слюда	$10^{14} \div 10^{15}$
Сфалерит	$10^5 \div 10^7$
Халькопирит	$10^{-3} \div 10^{-1}$

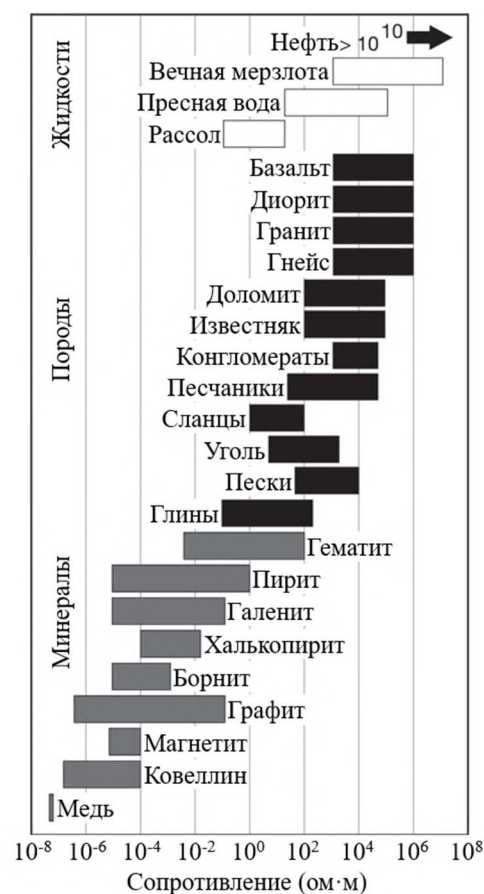


Рисунок 8 – Электрическое сопротивление некоторых геологических материалов [38].

Карбонаты – обладают повышенной, относительно кварца и полевых шпатов, проводимостью и диэлектрической проницаемостью, но остаются в классе диэлектриков. В воде гидролизуются образуя рассол.

Пирит – проводник, в тоже время обладает высокой диэлектрической проницаемостью. Даже в небольших количествах может привести к преодолению перколяционного порога, превращая породу в проводник [37].

Таблица 8 – Диэлектрическая проницаемость горных пород и минералов [38].

Минерал	ϵ_r	Минерал	ϵ_r
Кварц	4,19–5	Апатит	7,4–11,7

Форстерит, фаялит	6,8	Кальцит	6,35–8,7
Оливины	6,8	Доломиты	6,3–8,2
Силлиманит	11	Арагонит	7,4–8,67
Амфиболы, роговая обманка	4,9–8	Ангидрит	5,7–6,7
Графит	>81	Барит	7–12,2
Гематит	25	Гипс	5–11,5
Магнетит	34–81	Мусковит	6,2–8
Рутил	79–173	Биотит	6,2–9,3
Пирит	34–81	Хлорит	9
Галенит	17–81	Иллит	10
Сфалерит	6,9–12,1	Каолинит	9,1–11,8
Галит	5,7–6,2	Полевые шпаты	
Сильвит	4,4–6,2	Микроклин	5,48–5,6
Флюорит	6,2–8,5	Ортоклаз	4,5–6,2
Анортит	6,9–7,24	Олигоклаз	6,06
Лабрадорит	5,8–5,87	Альбит	5,3–6,95

Наличие минеральной компоненты влияет на проводимость и диэлектрическую проницаемость ИТТ [29, 41]. Исследования зависимости проводимости от зольности показали, что при увеличении зольности в углях со степенью метаморфизма до тощего растёт и проводимость. Для полуантрацитов и антрацитов, т.е. углей, приближающихся по составу к чистому углероду, зависимость обратная [41]. Зольность не показывает непосредственного содержания минеральной компоненты, т.к. определяется по количеству золы после сжигания породы, а, следовательно, существенных термохимических превращений, но качественно имеет прямую корреляцию. Компоненты, слагающие минеральную часть ИТТ, имеют большой разброс количественных характеристик, наличие проводниковых, в т.ч. нелинейных, и ионообменных свойств и крайнюю степень гетерогенности. В результате минералы в ИТТ приносят примесную проводимость, что и приводит к увеличению проводимости углей низкой и средней степени метаморфизма, органическая компонента которых обладает относительно высоким сопротивлением. В углях высокой степени метаморфизма собственная проводимость органического вещества весьма высока, поэтому минералы увеличивают сопротивление таких пород. Диэлектрическая проницаемость такой многокомпонентной системы весьма высока в области частот вплоть до микроволнового диапазона. Основной вклад в поляризацию ИТТ вносят: накопления объёмного заряда в порах, наличия сорбированной воды с растворёнными ионами, наличие проводниковых (пирит) и ионообменных (глины) компонент. Дополнительным фактором служат сопряжения компонент с различными проводимостью и диэлектрической проницаемостью [42].

1.3 Электрофизические процессы в ископаемых твёрдых топливах

1.3.1 Пробой ископаемых твёрдых топлив

Условно пробой делится на 3 основных типа: электрический, тепловой, пробой вследствие деградации (электрохимический, электромеханический, ионизационный и т.д.) [43]. Электрический пробой в чистом виде можно наблюдать только в чистых, гомогенных материалах. При этом необходимо тщательно соблюдать ряд методических требований, исключающих возникновение других видов пробоя: теплового, по поверхности, вследствие приэлектродных ионизационных явлений. Происходит он при высоких напряжённыхностях порядков МВ/см, а электрическая прочность, в этом случае, фундаментальная характеристика вещества. ИТТ представляют собой композитный материал со множеством весьма различных фаз. Интегрально исходная порода относится к слабопроводящим или полупроводящим материалам. Поэтому понятие электрического пробоя не применимо к ИТТ.

Тепловой пробой в самом общем случае происходит из-за разогрева материала при воздействии электрического поля. В случае нарушения термодинамического равновесия, т.е. превышении выделения тепла над его отводом, происходит тепловой пробой. Нагрев материала происходит из-за собственной проводимости, не равной нулю в любом реальном материале, и диэлектрических потерь. Причем чем менее гомогенен материал, тем более активные и диэлектрические потери. К частному случаю теплового пробоя приводит наличие в материале канала повышенной проводимости. Этот канал может появиться в присутствии крупного дефекта в материале или вследствие деградации и карбонизации.

Основные факторы формирования канала пробоя в ИТТ это собственная локальная проводимость и резко неоднородная структура. Пробой в этом случае должен быть классифицирован, как тепловой пробой в канале высокой проводимости [43,44]. При воздействии напряжения на материал, в объёме которого присутствует узкий канал повышенной проводимости происходит разогрев последнего. Разогрев приводит к ещё большему увеличению проводимости и, в случае нарушения термодинамического равновесия, к пробую. Теплопроводность ИТТ, как и многих диэлектрических и полупроводниковых материалов, низка, для целиков угля $\sim (0,15 \div 0,25)$ [29]. Поэтому даже при низких уровнях, выделяемой в канале проводимости, мощности вероятность теплового пробоя высока. Стоит так же учитывать, что даже при нарушении термодинамического равновесия выделяемой мощности может быть недостаточно для резкого снижения сопротивления образца. То есть тепловой пробой может

иметь весьма длительную экспозицию. На завершающей стадии пробоя наблюдается резкий рост тока при неизменном или даже снижающемся напряжении.

Наибольшая плотность тока достигается в стохастически определённом локальном канале, в котором происходит термическое и механическое разрушение материала. Стохастичность формирования канала пробоя связана, в том числе, со структурой ИТТ. Ключевое влияние на формирование канала теплового пробоя, помимо теплопроводности, имеет проводимость материала и включений в нём или его компонент [43]. Электрическое поле и протекающий ток локализуются в первую очередь в местах с наименьшим сопротивлением. Наибольшей проводимостью обладают сульфиды, в частности пирит. Хуже, но ещё достаточно хорошо проводят ток глины. Органическую компоненту ИТТ, в связи с особенностями строения, можно отнести к слабопроводящим материалам. Влияние собственной проводимости органики на общую проводимость снижена в сравнении с притом и глинами. Кварц, полевые шпаты и карбонаты обладают низкой проводимостью, поэтому сами по себе являются балластом или барьером с точки зрения протекания тока. Однако стоит учитывать особенности взаимодействия компонент при воздействии электрического поля, а при рассмотрении теплового пробоя и температуры. Присутствие множественных границ разделов фаз, в следствие высокого уровня гетерогенности создаёт повышенную проводимость. Большинство горных пород обладает некоторой сорбционной способностью к воде, которая имеет некоторую насыщенность ионами. Наиболее показательны в этом ракурсе глины, обладающие высокой сорбционной способностью и катионообменной емкостью. Наличие глини при нагреве приводит к нелинейному динамическому изменению проводимости. На рисунке 9 приведена зависимость электропроводности глини от температуры во время их нагревания и охлаждения [45].

Нелинейность динамики проводимости вызвана наличием воды в глинах. Причём первый пик при $100\div 110^{\circ}\text{C}$ обусловлен выходом и последующим удалением сорбированной воды. При этом растворимость минералов растёт с температурой, что приводит к увеличению проводимости. Дальнейшее нарастание сопротивления $290\div 650^{\circ}\text{C}$ происходит по причине выхода конституционной воды. Точка перегиба при температуре $\sim 650^{\circ}\text{C}$ связана с полным удалением конституционной воды. С этим же связана меньшая проводимость в диапазоне температур $290\div 650^{\circ}\text{C}$ при остывании. В меньшей, но всё ещё высокой степени, вода, как сорбированная, так и конституционная, присутствует в прочих, не глинистых, компонентах породы. Стоит отметить, что выделяющаяся вода взаимодействует с другими компонентами ИТТ. Так, например, поверхностная проводимость кварца увеличивается, а карбонаты, в частности кальция, разлагаются под действием воды и температуры. Роль поверхности при пробое породы также весьма высока. Пробой вдоль слоёв или трещин кливажа происходит при

меньших напряжённостях [44]. Проводимость поверхности всегда выше, чем объёма, что приводит к формированию канала теплового пробоя в первую очередь вдоль внутренних поверхностей породы.

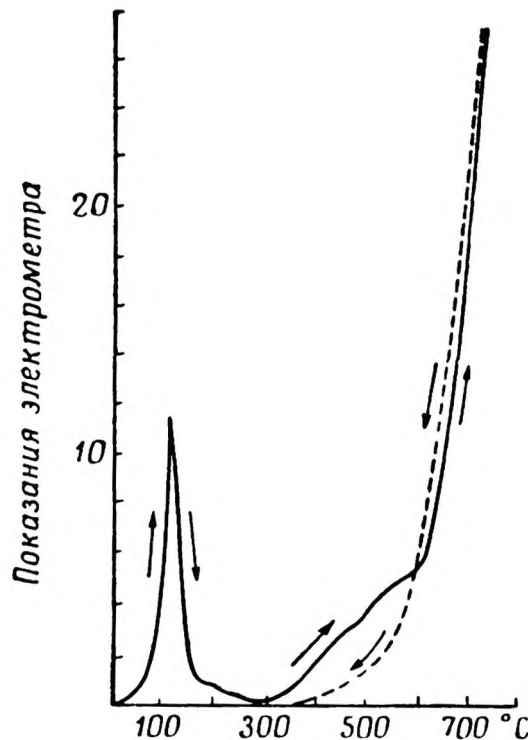


Рисунок 9 – Изменение электропроводности глин во время их нагрева и охлаждения [45].

Таким образом, локальные, а как следствие, и общие свойства ИТТ при протекании тока и формировании канала теплового пробоя динамически нелинейно изменяются. Главным образом это сказывается на проводимости и непосредственно зависит от температуры. Особенности макроструктуры породы, в частности слоистость и развитой трещиноватость, в существенной степени определяет пути протекания тока и формирования канала пробоя в ИТТ.

1.3.2 Электрическая деградация ископаемых твёрдых топлив

Дополнительным вклад в формирование канала пробоя в породе вносят частичные разряды (ЧР). В изоляционных материалах ЧР являются одним из ключевых факторов деградации [46, 47]. Специфика строения материала ИТТ заключается в наличии проводящих, газовых, полярных включений в присутствии органической и минеральной компонент. При воздействии ВН, достаточной амплитуды, на такую среду неизбежна инициация ЧР. В общем смысле к ЧР относятся любой пробой, не перекрывающий весь разрядный промежуток. На

практике к ЧР относят пробой микропор, микротрещин и иных микровключений, содержащихся в объеме изоляции [48, 49]. При достаточной энергии воздействие ЧР с течением времени приводит к образованию древовидных структур (дендритов), называемому электрическим триингом. На рисунке 10 [50-53] приведены примеры дендритов различных морфологий в полимерной изоляции.

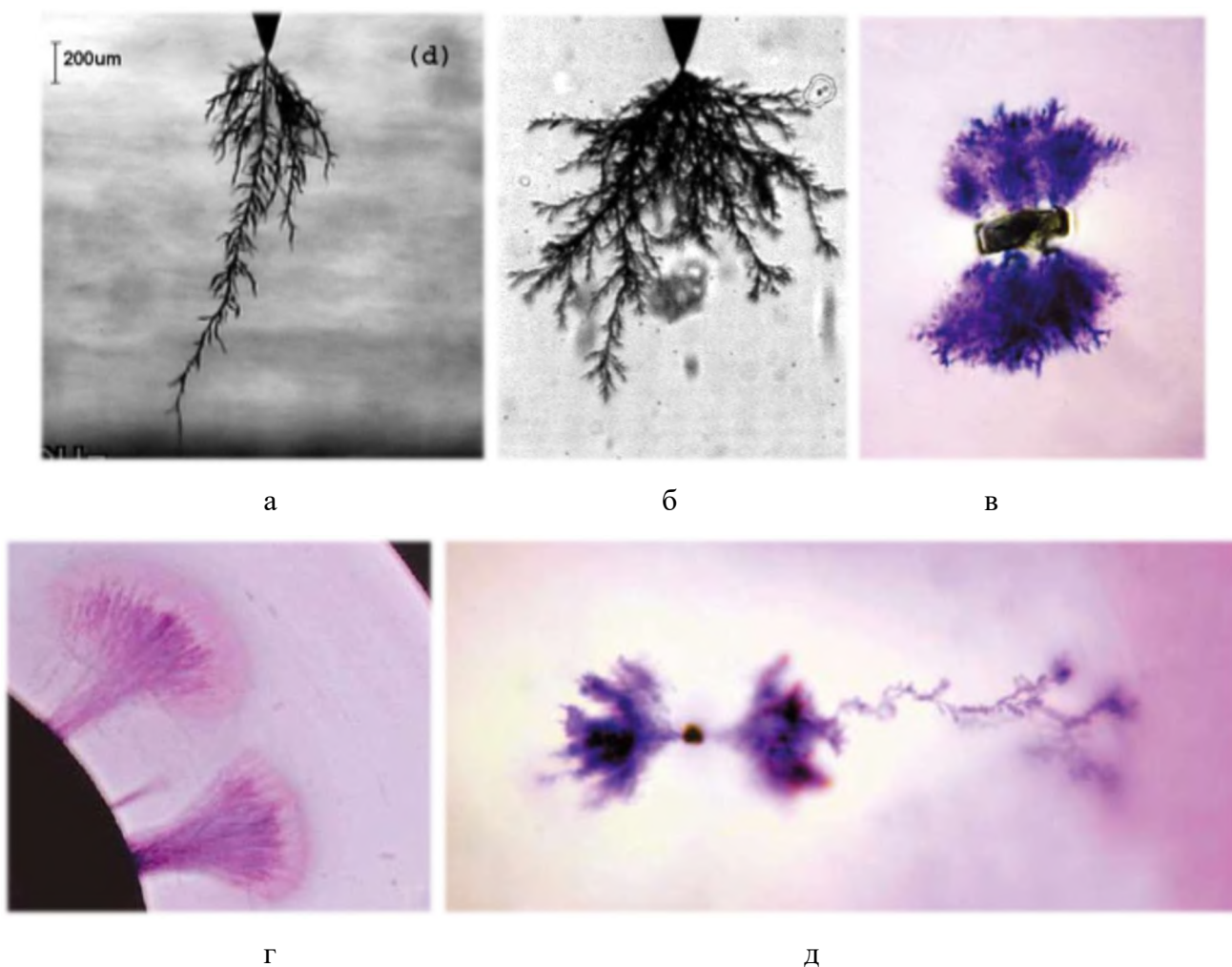


Рисунок 10 – Морфология дендритов в полимерной изоляции. а – древовидная, б – кустообразная, в – бант, г – веер, д – бант, переходящий в древовидную структуру [50-53].

В подавляющем большинстве минеральных материалов деградация вследствие ЧР происходит главным образом из-за термомеханических напряжений, возникающих на границе раздела с включением при воздействии разряда. В результате происходит постепенное дискретизированное разрушение материала, и рост полого дендрита. То есть по сути рост микротрещины. В некоторых случаях в порах под действием ЧР минеральные соединения разлагаются с выделением чистого металла, что приводит к росту металлизированных дендритов. Например, в керамике на основе титанатов образуются дендриты из титана.

В органических материалах ЧР приводят к разложению молекул на более простые. Дендрит в этом случае представляет собой газонаполненную полость, протяженную, преимущественно, в направлении силовых линий поля. В некоторых случаях происходит науглероживание стенок дендрита. Накопление углерода влечёт рост проводимости, и разрядная структура становится проводящей. На рисунке 11 [54] приведены микрофотографии свечения, создаваемого плазмой ЧР, в непроводящей и проводящей разрядных структурах.

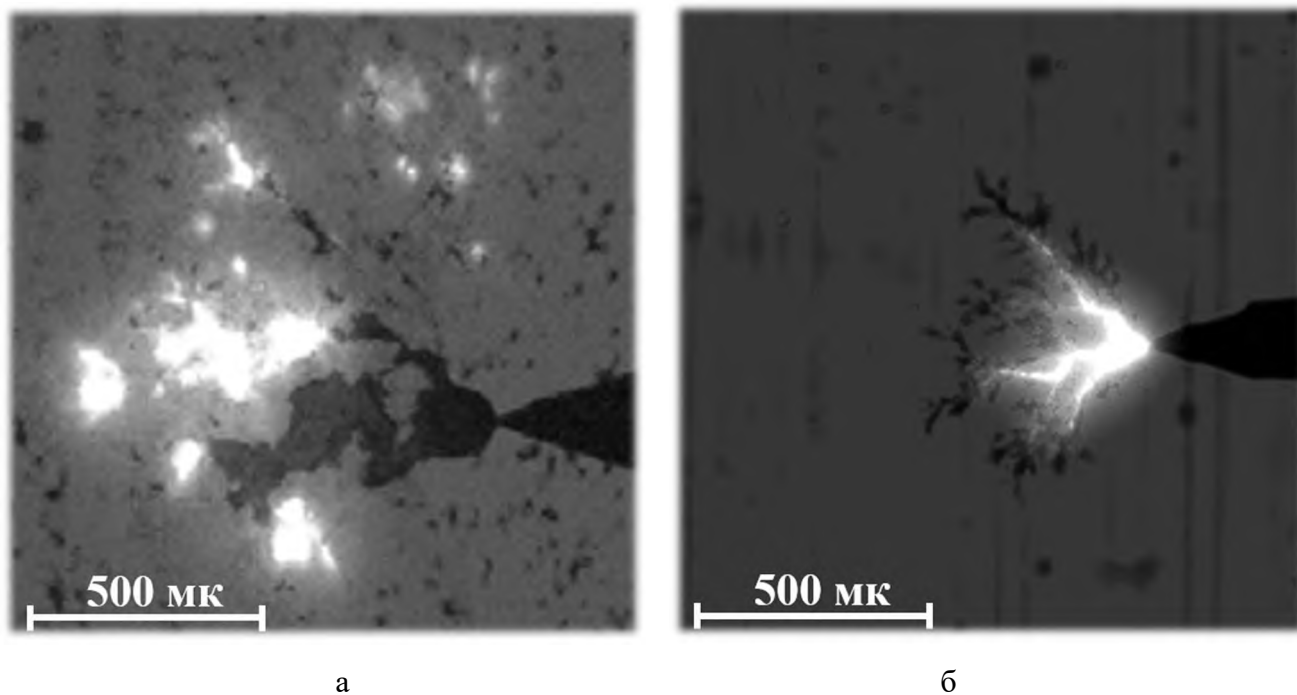


Рисунок 11 – Свечение, создаваемое плазмой ЧР, в проводящей (а) и непроводящей (б) разрядных структурах [54].

В случае роста микротрещины в минеральном материале или полости в органическом дендрит имеет высокое сопротивление, и ионизация происходит по всему телу структуры. При прорастании дендрита через весь межэлектродный промежуток по существу происходит пробой по поверхности. Если рассматривать рост металлизированных или углеродных разрядных структур, то в процессе разряды инициируются непосредственно на остриях. По сути происходит рост проводящего канала, который при прорастании через весь межэлектродный промежуток приводит к тепловому пробое в канале повышенной проводимости.

1.3.2.1 Диагностика частичных разрядов

Диагностика ЧР в материале – весьма нетривиальная задача, этой теме посвящено множество исследований и инженерных трудов. Для достижения максимальной корректности и

достоверности измерений характеристик ЧР этому вопросу стоит уделить особое внимание. В практике предупреждения выхода из строя изоляции высоковольтного оборудования используется множество методов обнаружения и измерения характеристик ЧР:

- Неэлектрические:
 - a. Оптический
 - b. Акустический
 - c. Химический
 - d. Термический
- Электрические:
 - a. Косвенные (измерение $\text{tg}\delta$, вольт-кулоновых характеристик и т.д.)
 - b. С помощью антенн
 - c. Регистрация ВЧ колебаний тока/напряжения

Неэлектрические методы зачастую неприменимы. Так ИТТ непрозрачны для оптического, а в связи со структурой, и ультразвукового излучения. Химический же метод в наибольшей степени косвенный и требует нецелесообразного усложнения аналитического оборудования. Контроль температуры обладает весьма низкой точностью из-за высокой теплоёмкости и низкой теплопроводности и существенных локальных количественных различий этих параметров. Так же порода нагревается не только вследствие ЧР, но и из-за проводимости. Косвенные электрические методы обладают низкой точностью, т.к. на измеряемые величины влияет множество процессов. Измерения характеристик ЧР с помощью антенн сильно подвержено внешним условиям и в особенности электромагнитной обстановке. В дополнение, перечисленные методы неприменимы из-за крайне резкой неоднородности и стохастичности структуры ИТТ. Наиболее точные и наименее опосредованные измерения характеристик частичных разрядов можно провести с помощью регистрации высокочастотных колебаний тока и/или напряжения, возникающих в межэлектродном промежутке, при инициации ЧР в материале. Базовые схемотехнические решения, используемые для измерения параметров ЧР приведены на рисунке 12 [48, 55].

Наиболее высокая точность измерений достигается при использовании мостовой схемы. При этом она весьма чувствительна к настройке компенсирующих цепей и несоответствию емкостей соединительного конденсатора и испытуемого объекта. Такая тонкая настройка и подбор C_0 для образцов ИТТ не представляется практически возможным. Это связано с существенным разбросом характеристик образцов породы, а также с их динамическими изменениями в процессе измерений. Схема измерения напряжения применима при больших ёмкостных токах и в сравнении со схемой измерения тока менее чувствительна. Токовая схема

более оптимальна ещё и по причине высокой, по сравнению с диэлектриками, и изменяющейся проводимостью породы, что в свою очередь вносит искажения в измерения. При этом для токовой схемы главное условие работоспособности $Z \gg C_x$ [55].

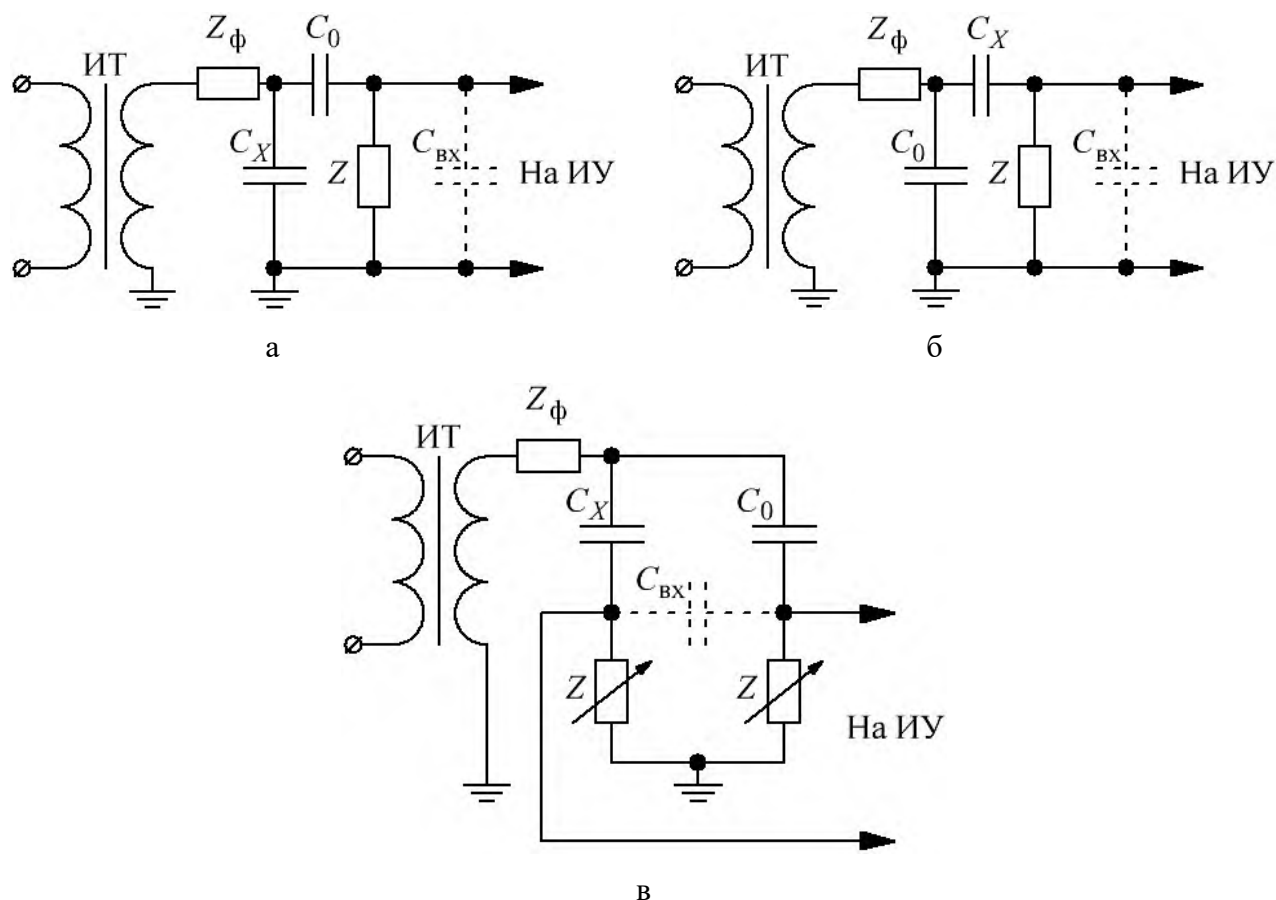


Рисунок 12 – Схемы измерения параметров ЧР. а) схема измерения напряжения на образце, б) схема измерения тока через образец, в) мостовая схема. ИТ – испытательный трансформатор, Z_ϕ – фильтровой импеданс, C_0 – соединительный конденсатор, C_x – испытуемый объект, Z – измерительный элемент, $C_{вх}$ – входная емкость измерительного устройства, ИУ – измерительное устройство [48, 55].

Для ЧР определены следующие параметры:

- кажущийся заряд единичного ЧР $q_{ч.р.}$
- частота следования $n_{ч.р.}$
- средний ток $I_{ч.р.}$
- средняя мощность $P_{ч.р.}$
- энергия единичного ЧР $W_{ч.р.}$
- квадратичный параметр ЧР $D_{ч.р.}$

Кажущийся заряд единичного ЧР – это заряд, протекающий через испытуемый образец при пробое единичного включения. Этот заряд называется кажущимся, т.к. технически

невозможно измерить непосредственно импульс ЧР и, по сути, проводят измерения характеристик отклика системы материал (в основном диэлектрик) – внешняя цепь на возмущение, возникшее вследствие разряда. Частота следования импульсов ЧР показывает количество разрядов, произошедших за секунду, не измеряется в герцах, из-за стохастического характера частичных разрядов. Средний ток определяется суммарным зарядом импульсов, отнесенным к временному промежутку между первым и последним, учитываемыми импульсами. Средняя мощность частичных разрядов определяется как произведение среднего напряжения, при котором происходят разряды на средний ток ЧР. Энергия единичного ЧР является произведением мгновенной мощности и времени разрядного импульса. Квадратичный параметр представляет собой сумму квадратов зарядов, проходящих через выводы испытуемого объекта в результате ЧР за одну секунду. Помимо перечисленных параметров, частичные разряды характеризуются напряжением и напряженностью возникновения, зажигания и погасания. Напряжение возникновения определяется как минимальное напряжение, соответствующее инициации ЧР. Напряжение зажигания/погасания – значение напряжения на включении, при котором возникает/гаснет единичный отдельно взятый ЧР.

Существуют стандартизованные методики и средства диагностики параметров ЧР. Однако они применяются на практике для хорошо изученных материалов и конструктивных решений. Эти способы подходят для оценки надежности и остаточного ресурса изоляции на основании накопленного массива данных для конкретных конструкций и материалов. То есть измеренные данные сравниваются с эмпирическими с целью выявления аварийного или предаварийного состояния и принятия решения о необходимости обслуживания ВВ системы. Типы и параметры датчиков и применяемые методики регламентируются стандартом ИЕС(МЭК)60270 [56]. В специализированной литературе даются рекомендации использования систем на основе осциллографа [55] или широкополосного прибора аналогичного ему [57] для измерения параметров и исследования ЧР. При этом в стандарте ИЕС(МЭК)60270 указано, что он не распространяется на ультраширокополосные средства измерений к которым относятся системы на основе осциллографов. Таким образом стандартные средства измерений ЧР не подходят для исследовательских целей. Однако общие технические рекомендации ИЕС(МЭК)60270 применимы в любом случае.

1.3.3. Конверсия ископаемых твёрдых топлив джоулевым теплом в проводящем канале

В результате пробоя в ИТТ формируется проводящий канал, подвергающийся сильному нагреву вследствие протекания тока [44, 58]. При нагреве породы происходит разложение органической компоненты [3]. Сам процесс разложения зависит от температурного режима [36, 59-61], который в свою очередь зависит от подводимой к каналу мощности. Идея использовать канал пробоя ИТТ высоким напряжением для газификации углей предложена Агроскиным [44], однако подробных исследований этого процесса в его работах не приведено.

Термическая конверсия ИТТ происходит при отсутствии или сильном недостатке окислителя, в частности воздуха. При этом стоит учитывать, что на начальной стадии нагрева (до $\sim 150\div 200^\circ\text{C}$) десорбируются легкие летучие соединения, а при высоких температурах протекают вторичные химические реакции. Степень влияния вторичных реакций определяется температурным режимом, т.е. скоростью нагрева и максимальной температурой. Термическое разложение органической компоненты ИТТ начинается при температуре $\sim 180\div 350^\circ\text{C}$, в зависимости от типа и зрелости ИТТ. Максимальная интенсивность выделения смолы, газа и остаточного углерода достигается в интервале температур $\sim 450\div 600^\circ\text{C}$. Дальнейшее повышение температуры приводит к увеличению газовой фазы, и снижению количества смолы и твёрдого остатка. Это связано с увеличением влияния вторичных химических реакций и термического разложения парогазовой фазы. Смола при более высоких температурах становится более тяжёлой и содержит больше ароматических соединений из-за их термостабильности.

В классических технологиях переработки ИТТ диапазон температур $\sim 450\div 600^\circ\text{C}$ и до 800°C называется полукоксованием, а $\sim 900\div 1100^\circ\text{C}$ – коксованием. Условно принимают, что при полукоксовании вторичные химические реакции происходят весьма менее интенсивно, что приводит к образованию легких фракций смолы и относительно высокому содержанию углеводов в газообразных продуктах. Полукокк содержит в своём составе наиболее тяжёлые соединения, разлагаемые уже при температурах коксования. При коксовании газовой фазы в продуктах существенно больше, а кокс не содержит летучих или разлагаемых органических соединений, т.е. представляет собой углерод с минеральными примесями.

Влияние скорости нагрева на продукты термической деструкции органической компоненты ИТТ обусловлено более медленным и продолжительным разложением органики. При быстром нагреве преобразование идет сразу в наиболее термостабильные компоненты. Медленное повышение температуры создаёт условия для сохранения более лёгких фракций

смолы и углеводородных газов. Помимо этого, медленный нагрев способствует протеканию вторичных реакций, а именно, разложению тяжелой смолы на более легкие компоненты.

Важным фактором также является направление тепломассопереноса. Так при внешнем нагреве температура поверхности породы выше внутренней части. При этом парогазовая фаза, покидая реакционную зону разложения, проходит через горячую оболочку, подвергаясь вторичному разложению. Если используется внутренний нагрев, тепло и продукты термодеструкции распространяется во вне, относительно реакционной зоны. Нагретые продукты частично реагируют с исходной породой и конденсируются в ней. В целом стоит отметить высокую степень влияния способа конверсии на зависимость качественного и количественного состава на конечные продукты от температурного режима [59-61]. Так медленный нагрев приводит к более селективной деструкции органических компонент. При этом скорость эвакуации продуктов низкая, что приводит к росту влияния вторичного разложения, степень влияния которого определяется максимальной температурой. Таким образом, процесс конверсии зависит от синергии множества обстоятельств. В качестве основных можно выделить: способ нагрева, направление тепломассопереноса, скорость нагрева, максимальная температуры.

Выводы по главе

Из множества предложенных способов подземной разработки ИТТ промышленно внедрены дутьевые и гидроразрыв пласта. Дутьевой способ позволяет получать газообразные продукты с низкой теплотворной способностью, жидкие продукты являются побочными и не используются. ПГУ обладает плохой управляемостью. Гидроразрыв пласта имеет ряд специфических аспектов использования. ГРП достигает рентабельности при утилизации конечных продуктов в относительной близости от месторождения (местные ресурсы). Пласты рентабельные для разработки ГРП должны обладать большой мощностью и высоким содержанием органической компоненты. Поэтому остаётся актуальным вопрос разработки месторождений способами альтернативными ГРП и ПГУ. Одним из таких подходов может стать электрофизическая конверсия ИТТ, однако разработка полноценной технологии требует всестороннего и комплексного изучения этого процесса.

ИТТ представляют собой весьма гетерогенный материал нерегулярного строения и химического состава. Ископаемые твердые топлива можно охарактеризовать как композиционный материал, имеющий в составе минеральную и органическую компоненту. При этом каждая из компонент может быть представлена различными по свойствам химическими соединениями. Это обстоятельство приводит к весьма существенным различиям электрофизических свойств как отдельных составляющих породы, так и ИТТ различных месторождений. Более того эти различия могут быть весомыми даже в рамках одного месторождения.

С электрофизической точки зрения в подавляющем большинстве случаев ИТТ представляют собой слабопроводящий материал, склонный к существенной степени поляризации вследствие особенностей строения и состава. В такой среде под действием высокого напряжения инициируются частичные разряды, нагрев вследствие проводимости и последующий пробой. Основными эпицентрами ЧР в породе являются микропоры и микротрещины и включения высокой проводимости. Канал протекания тока будет ориентироваться по наиболее низкоомным областям и включениям. При этом десорбция воды будет создавать изменяющуюся во времени и по объёму проводимость. С учётом повышенной, относительно объёма вещества, проводимости поверхности этого вещества Каналы протекания тока и пробоя будут ориентироваться вдоль слоёв и кливажных трещин.

Измерение параметров частичных разрядов с исследовательской точки зрения нетривиальная задача. Наиболее оптимальной схемой измерения в этом случае будет

ультраширокополосная схема измерения колебаний тока через образец, обладающая наибольшей чувствительностью и наименьшими искажениями.

Основные факторы деградации материала ИТТ под действием напряжения – ЧР и температура. Для построения феноменологической модели формирования канала пробоя необходимо изучить базовые параметры частичных разрядов в связке с температурой и проводимостью породы. Важными критериями в данном случае будут напряжение и напряженность возникновения ЧР в связке с проводимостью и, как следствие, нагревом породы. С ростом напряжения увеличивается температура и интенсивность частичных разрядов, т.е. пробой происходит вследствие синергии этих явлений.

Канал пробоя имеет повышенную относительно исходного материала проводимостью, что позволяет полагать техническую возможность его использования в качестве нагревательного элемента. Нагрев при этом осуществляется для термической конверсии твердых топлив. При этом градиенты температур в породе зависят от вводимой мощностью, что позволят в некоторых пределах управлять составом конечных продуктов.

Глава2. Методика и аппаратное обеспечение исследования электрофизической конверсии

2.1. Этапы электрофизической конверсии

Для осуществления термической конверсии за счёт джоулева тепла органической компоненты ИТТ в жидкие и газообразные продукты необходимо сформировать в породе канал высокой проводимости. Технологически весь процесс делится на 2 основных стадии: формирование канала и непосредственно разложение органики в результате нагрева.

Технически стадия формирования проводящего канала делится на 2 этапа. На первом этапе под действием ВН формируется устойчивая локальная структура повышенной проводимости в исходной породе. Проводимость этой структуры выше, чем у исходной породы, но недостаточна для её непосредственного использования в качестве нагревательного элемента, в связи с весьма малым поперечным сечением. Поэтому на втором этапе к начальному каналу прикладывается ВН меньшей величины, но большего тока. Из-за джоулева тепла происходит карбонизация сопряжённых с каналом областей, его расширение и снижение сопротивления. Далее посредством источников НН пропускается ток высокой величины, что приводит к продуктивной конверсии. При этом происходит дальнейшая карбонизация породы в области непосредственного прилегания породы к нагреваемому каналу. Из-за этого сопротивление рабочей области падает.

Таким образом, сопротивление нагрузки, представляющей собой участок пласта в полевых условиях или фрагмент породы в лабораторных, снижается на 5÷8 порядков. Источник напряжения, реализованный одним агрегатом и имеющий столь широкий нагрузочный диапазон, не представляется оптимальным с точки зрения стоимости, КПД, массогабаритов. Можно выделить три поддиапазона при разбивке всего процесса на этапы. На первом этапе сопротивление высоко и для формирования канала необходим источник ВН, обеспечивающий величину напряжения десятки киловольт. На втором сопротивление снижено, но необходим источник ВН величиной до десяти киловольт. На третьем этапе применяется источник НН, обеспечивающий ток несколько сотен ампер. Поддиапазоны переключаются дискретно, внутри них величина напряжения изменяется плавно с помощью регулятора.

2.2. Лабораторный комплекс для исследования электрофизической конверсии ископаемых твёрдых топлив

Для исследования электрофизической конверсии ИТТ в лабораторных условиях использовался аппаратный комплекс, структурная схема которого представлена на рисунке 13. В состав комплекса входят следующие функциональные блоки:

Регулятор напряжения

Высоковольтный трансформатор до 100 кВ

Высоковольтный трансформатор до 10 кВ

Коммутационный блок

Пульт управления

Вспомогательные узлы и системы (герметичная камера, вакуумная система, газовая система)

Диагностическое и измерительное оборудование

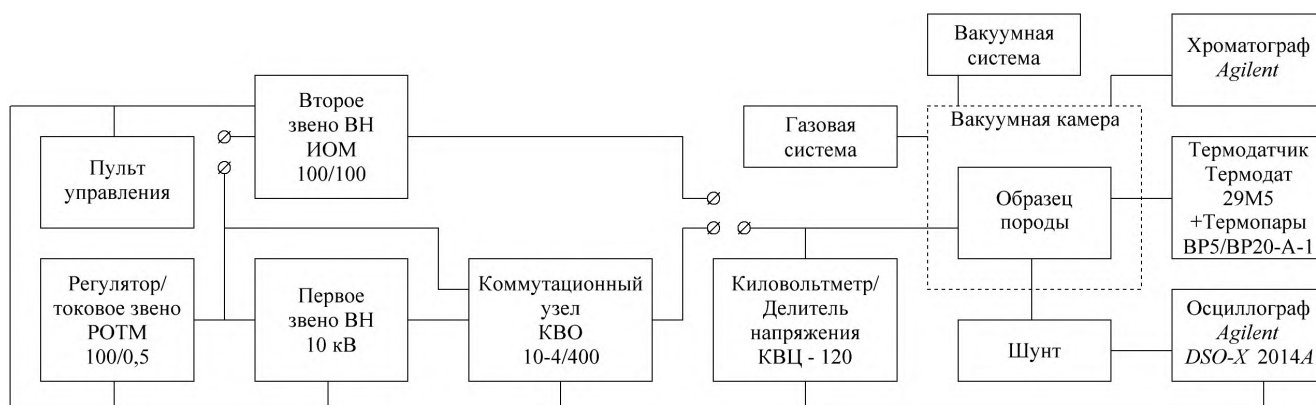


Рисунок 13 – Структурная схема аппаратного комплекса для исследования электрофизической конверсии ИТТ.

Регулирование осуществлялось трансформатором типа РОТМ 100/05. В качестве силового трансформатора для первого поддиапазона сопротивления породы использовался ИОМ 100/100. Для второго поддиапазона повышающий однофазный трансформатор несерийного производства с величиной действующего напряжения на выходных клеммах 10 кВ. РОТМ обеспечивает ток до 264 ампер, что позволяет использовать его не только в качестве регулятора, но и для продуктивного нагрева породы в лабораторных условиях. Для коммутации силовых трансформаторов к нагрузке применялись контакторы КВО-10-4/400. Максимальное коммутируемое рабочее напряжение этих контакторов – 10 кВ, поэтому ИОМ подключался к нагрузке вручную с отключением нагрузочной шины. Это снижает эргономику, но существенно уменьшает стоимость и массогабаритные параметры. Управление комплексом осуществлялось с

пульты релейной автоматики. Для создания безокислительной среды, имитирующей недостаток кислорода в пласте, использовалась герметичная камера объемом ~60 л с форвакуумным насосом. Экспериментальный объем заполнялся азотом для имитации давления флюидов в пласте. Работа установки со стороны первичных цепей контролировалась вольтметрами и амперметрами, подключенными через трансформаторы тока. Численные значения напряжения на образце измерялись киловольтметром КВЦ-120. Форма напряжения фиксировалась с помощью осциллографа *Agilent DSO-X 2014A* и делителя напряжения, входящего в состав КВЦ-120. Форма и численные значения полного тока через образец и тока ЧР фиксировались тем же осциллографом и токовым шунтом.

Характеристики основных узлов и агрегатов лабораторного комплекса указаны в таблице 9.

Таблица 9 – Характеристики основных узлов и агрегатов лабораторного комплекса.

Тип	РОТМ 100/05 У4	двухотмоточный повышающий трансформатор	ИОМ 100/100 УЗ
Параметр			
Функция	Регулятор/токовое звено	Первое звено ВН	Второе звено ВН
Схема и группа соединения обмоток	1-Авто	I/I-I-0	I/I-0
Номинальная мощность, кВ·А	100	3	100 – кратковременно 40 – продолжительно
U НН, В	220/380	220	220/380
I НН, А	от 300 до 105	150	264
U ВН, кВ	0,4	5 – первая отмотка 10 – вторая отмотка	100 – 30 мин 90 – 1 час 80 – 2 часа 66,7 - неограничено
I ВН, А	264	6 – первая отмотка 3 – вторая отмотка Двукратное превышение тока не более 30 мин	1 – 30 мин 0,6 – неограниченно

В качестве коммутаторов использовались контакторы КВО-10-4/400

Номинальное напряжение 10 кВ.

Наибольшее рабочее напряжение 12 кВ.

Номинальный ток 400 А.

Номинальный ток отключения 4 кА.

Полное время отключения не более 0,15 с.

Номинальное напряжение цепей питания привода 220 В (переменного или постоянного тока).

Вспомогательные системы комплекса включают герметичную камеру, вакуумный насос, узлы для напуска газа. Вакуумировалась экспериментальная камера пластинчато-роторным форвакуумным насосом Pneumofore UVL 60. Напуск азота производился из баллона посредством шлангов и газового редуктора. Экспериментальная камера объемом ~60 л представляет собой трубу с двумя фланцами по торцам (рис. 14).

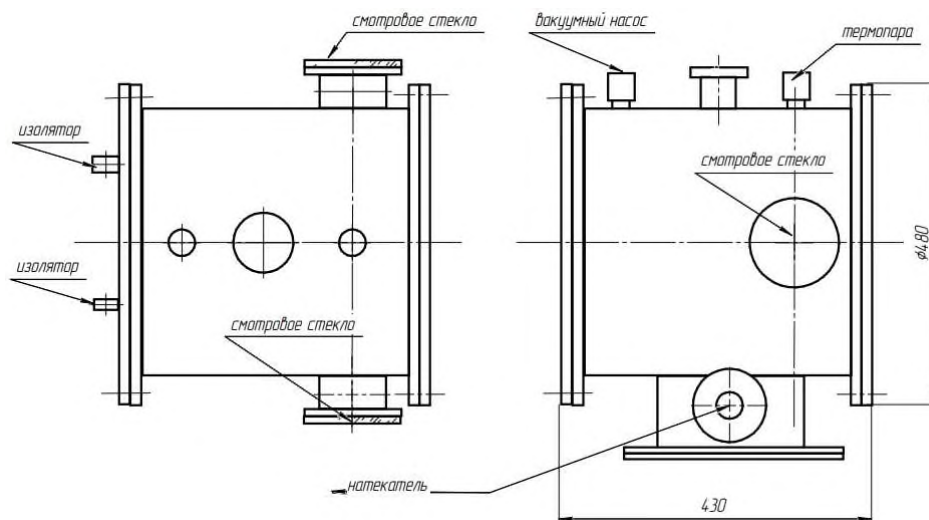


Рисунок 14 – Габаритный чертёж экспериментальной камеры.

Использование двух источников высокого напряжения обусловлено двумя факторами. Во-первых, из-за сильного и нелинейного падения сопротивления образца в процессе нагрева, требуется обеспечение нелинейной нагрузочной характеристики в весьма широком диапазоне мощностей. Во-вторых, в большинстве случаев параметры ЧР измеряются при работе менее мощного и габаритного источника напряжения, который создаёт меньше помех. Это важный нюанс при измерении низкоэнергетичных импульсов ЧР наносекундного диапазона.

2.3. Диагностическое оснащение и измерительное оборудование

Серийное оборудование

Для измерения распределения температуры использовался измерительный блок Термодат 29М5 с вольфрам-рениевыми термопарами ВР5/ВР20-А-1 (рис. 15). Термодат представляет собой самописец с 12 входными аналоговыми каналами. Использование термопар ВР обусловлено большим (~50 %) содержанием водорода в газообразных продуктах конверсии в сочетании с высокой максимальной измеряемой температурой, достигающей в некоторых

случаях ~ 1500 °С. Для изоляции термопары от тока, протекающего через образец применяется корундовый чехол. Максимальная температура эксплуатации такого чехла 1750 °С.

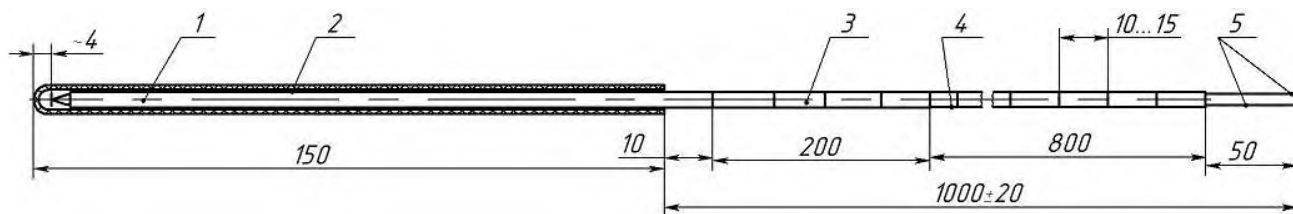


Рисунок 15 – Схематичное изображение термопары с защитными приспособлениями. 1 – трубка корундовая (C799) двухканальная, 2 – чехол корундовый (C799), 3 – трубка корундовая (C799) двухканальная, 4 – трубка МКР двухканальная, 5 – термоэлектроды ВР 5/20 градуировка А-1.

Численные значения и форма напряжения на образце регистрировались цифровым киловольтметром КВИЦ-120 с применением осциллографа *Agilent DSO-X 2014A*.

Основные характеристики КВИЦ-120:

Диапазон измеряемого входного постоянного и переменного синусоидального напряжения:	до 120 кВ.
Амплитудное значение максимального измеряемого напряжения, не менее	180 кВ.
Входное сопротивление по постоянному току	500 МОм $\pm 10\%$
Продолжительность непрерывной работы	не ограничена

Базовые параметры осциллографа *Agilent DSO-X 2014A*: количество каналов – 4; полоса пропускания - 100 МГц; частота дискретизации - 2 Гвыб/сек.

Аналитическое оборудование

Исследования морфологии поверхности слома и микроанализ элементного состава горючих сланцев осуществлялись растровым электронным микроскопом *LEO1455VP* детектором отраженных электронов при ускоряющем напряжении 20 кВ.

Количественный элементный состав горючих сланцев определялся атомно-эмиссионной спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре *iCAP 6300 Duo, Thermo Scientific*.

Состав газообразных продуктов конверсии анализировался с помощью хроматографа *Agilent 7890 A* с колонкой *ShinCarbon ST (RESTEK)* и детектором по теплопроводности. Газ носитель – гелий. Отбор пробы осуществлялся непосредственно из камеры соединённой материальной линией через фильтры с хроматографом.

Жидкие продукты подвергались качественному анализу четырех полученных фракций сланцевой нефти методом газовой хроматографии/масс-спектрометрии на газовом хроматографе *Agilent 7890A* с селективным квадрупольным масс-детектором. Температура начальная – 70°C в течение 5 минут, скорость нагрева – 10°C/мин, температура конечная – 270°C в течение 7 минут. Идентификацию компонентов проводили, сравнивая полученные масс-спектры со стандартной библиотекой масс-спектров веществ.

При разделении использовали н-гексан марки "х.ч.", толуол марки "х.ч.", метанол марки "х.ч." и дихлорметан марки "х.ч.", без предварительной очистки. Оксид алюминия (Al_2O_3) активировали прокаливанием в муфельной печи 2 часа при 150°C.

Схема измерения ЧР

Наиболее оптимальным образом для измерения параметров ЧР в ИТТ подходит токовая схема (рис. 16). С одной стороны, она более чувствительна, чем схема измерения напряжения на образце с другой стороны не требует весьма точной настройки, как мостовая схема. Проводимость ИТТ существенной выше, чем у диэлектриков, поэтому схема измерения напряжения будет разрешать меньшую точность. Совокупно электрофизические характеристики ИТТ весьма различны от фрагмента породы к фрагменту к тому же динамически нелинейно меняются в процессе эксперимента, что делает применение мостовой схемы нецелесообразным.

Экспериментальная установка имеет в составе два высоковольтных трансформатора. При измерении параметров ЧР в основном использовался трансформатор несерийного производства с выходным напряжением 10 кВ. Такого уровня напряжения вполне достаточно для инициации ЧР в ИТТ, а габариты и напряжённости электрического поля внутри трансформатора существенно ниже, чем у ИОМ-100/100. Трансформатор ИОМ-100/100 крупногабаритный, из-за чего возрастают и его паразитные параметры, что весьма выражено при низких рабочих напряжениях, к тому же вероятность появлением собственных ЧР в этом аппарате выше. Конструктивные индуктивности и емкости трансформатора в совокупности с остальной схемой могут создавать паразитные колебательные контура и искажать измеряемый сигнал. Через межобмоточную и межвитковую емкость из питающих цепей могут просачиваться помехи, в особенности импульсные. Эти помехи могут обладать достаточно высокой амплитудой и, не смотря на наличие фильтрового импеданса, затруднять измерения или снижать достоверность получаемых данных. Таким образом, использование среднегабаритного испытательного трансформатора с низким, относительно крупногабаритного, напряжением вторичной обмотки обусловлено снижением влияния паразитных параметров и помех на измерения.

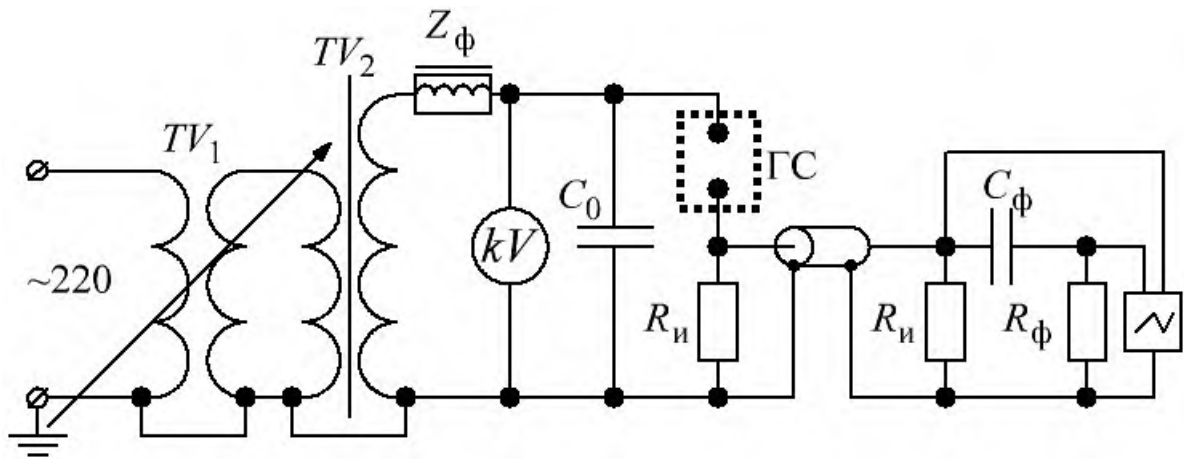


Рисунок 16 – Схема измерения параметров ЧР. TV_1 – регулятор напряжения (ПОТМ), TV_2 – повышающий трансформатор 10 кВ, Z_ϕ – блокирующий импеданс, kV – КВЦ – 120, C_0 – соединительный конденсатор, ГС – образец породы горючих сланцев, $R_{и}$ – измерительное сопротивление, $C_\phi R_\phi$ – фильтр верхних частот [48, 55].

Фильтровой импеданс представляет собой проволочный резистор ПЭВР-100-1 $\text{кОм} \pm 5\%$ с ферритовым наборным стержнем. Конструктивно сопротивление выполнено в виде катушки и имеет собственную индуктивность 478 мкГн при 1 МГц. Ферритовый стержень увеличивает индуктивную составляющую до 6,78 мГн при 1 МГц. Для стабилизации индуктивности в частотной области использовались ферриты с магнитной проницаемостью 50, 1000, 3000. Реактивная составляющая Z_ϕ практически не оказывает влияния на цепь при рабочей частоте 50 Гц. При этом активная составляющая относительно низка, что позволяет исследовать породы с низким сопротивлением от первых десятков кОм и практически влияние Z_ϕ на результаты эксперимента. Для импульсных сигналов с типичными для ЧР фронтами от единиц до десятков наносекунд индуктивная составляющая существенно увеличивает Z_ϕ .

Соединительный конденсатор представляет собой сборку из 6 конденсаторов КВИ-3-3300 пФ-10 кВ. За счёт этого достигается достаточная для измерений емкость 575 пФ при длине сборки 105 мм, что позволяет сократить длину соединительных проводников до ~ 50 мм. Эта длина оказывает существенное влияние на сигнал вследствие паразитной индуктивности проводников, поэтому должна быть по возможности минимальной [55; 56]. Если выводы C_0 длиннее некоторой критической отметки, то соединительная емкость не оказывает влияния на путь протекания импульсного сигнала, что ведет к искажению получаемых данных. Конденсаторы типа КВИ обладают весьма низкой собственной индуктивностью при относительно высоких емкостях и пробивных напряжениях и предназначены для работы с импульсными сигналами, т.е. оптимальным образом подходят для использования в качестве соединительного конденсатора.

Защита от помех при измерении характеристик ЧР – одна из важных задач, т.к. даже сигналы с низкой энергией способны ухудшить чувствительность схемы и достоверность получаемых данных. Одним из наиболее частых и интенсивных источников помех являются коронные разряды [48; 55]. Для исключения этого фактора использовались некоронирующие соединительные шины со скруглёнными кромками и отшлифованные.

В качестве измерительного элемента использовался резистор как наиболее широкополосный элемент с наименьшими амплитудно-частотными искажениями. Тип резистора выбран *SMD*, т.к. за счет габаритов и размеров контактных площадок паразитные параметры пренебрежимо малы. Номинал 150 Ом обусловлен согласованием с волновым сопротивлением соединительного кабеля. Кабель РК 150–7–31 использовался в связи со своим низким коэффициентом затухания и волновым сопротивлением 150 Ом, которое выше, чем наиболее широко распространенные 50 и 75 Ом. Это позволило согласовать измерительную систему, повысив чувствительность вследствие более высокого сопротивления. Согласование выполнено на обоих концах для снижения влияния паразитных параметров питающей и измерительной цепей на измерительный элемент, а также получения одного номинала эквивалентного сопротивления во всем диапазоне частот [46].

Характеристики кабеля РК 150-7-31

Волновое сопротивление, Ом	150±10
Коэффициент затухания, не более, дБ/м, на частоте 0,045 ГГц	0,08
Коэффициент затухания, не более, дБ/м, на частоте 3 ГГц	1,2
Электрическая емкость, пФ/м	29

С целью фильтрации импульсных сигналов от рабочей частоты использовался простейший двухзвенный RC-фильтр высоких частот. Фильтр, состоящий из малого количества элементов, имеет наименьшее количество паразитных параметров и наибольшую стабильность АЧХ в широком частотном диапазоне. Измерительные сопротивления и фильтры выполнены в коаксиальном исполнении, т.е. конструктивно интегрированы в волновод, образованный измерительным кабелем. Такая конструкция применена с целью минимизировать собственную индуктивность, т.е. длину, соединительных линий всех элементов, как рекомендовано в [56], а также защитить измерительные цепи и устройства от помех.

Характеристики фильтра RC-ФВЧ

Входное сопротивление первого звена на ВЧ, не менее Ом	1800
Входное сопротивление второго звена на ВЧ, не менее Ом	30000

Коэффициент ослабления на частоте 50 Гц, дБ	-46,7
Коэффициент передачи 0,9, на частоте, Гц	13000
Коэффициент передачи 0,97, на частоте, Гц	46000

Функции измерительного устройства выполнял осциллограф *Agilent DSO-X 2014A*.

Методика эксперимента

Перед экспериментами проводились измерения собственных ЧР системы. Электроды помещались в органическое стекло габаритами 250x80x80 мм на расстоянии 200 мм. Испытания показали отсутствие каких-либо импульсов, в том числе коронных или частичных разрядов, до напряжения 5 кВ. При напряжениях выше 5 кВ появляется «корона» слабой интенсивности несопоставимая по амплитуде с основной массой сигналов ЧР регистрируемых при том же уровне рабочего напряжения.

Образцы необходимых размеров выпиливались на камнерезном станке из кусков породы. Под электроды высверливались глухие отверстия диаметром 8 мм и глубиной 50 мм. В качестве электродов использовались стержни из вольфрама длиной 100 мм и диаметром 8 мм. Стержни заглублялись на полную глубину отверстий параллельно друг другу. Напряжение на образце повышалось от 0 В до значения до напряжения возникновения ЧР $U_{\text{чр}}$, которое фиксировалось по появлению характерных пиков на экране осциллографа. В экспериментах по изучению конверсии напряжение повышалось до пробоя образца для формирования в нем проводящего канала. Пробой осуществлялся на воздухе, после чего образец перемещался в герметичную камеру для дальнейшего нагрева, или изначально в герметичной камере. Подключение питания к образцу производилось через герметичные керамические проходные изоляторы на грибковом уплотнении. Перед нагревом породы камера откачивалась форвакуумным насосом и заполнялась азотом. Давление инертной среды выбиралось соответственно давлению флюидов в пласте, которое напрямую зависит от глубины залегания. В экспериментах по длительной конверсии образец предварительно заливался бетоном, армированным стеклопластиковой арматурой. Такой подход позволяет исключить растрескивание и рассыпание образца при нагреве, что влечёт невозможность продолжения эксперимента. В естественных условиях залегания пласта растрескивание может привести лишь к увеличению трещиноватости, но не к полному разрушению фрагмента породы с последующей невозможностью нагрева. Арматура из стеклопластика использовалась для исключения влияния металлических стержней на формирование канала под действием ВН и пути протекания тока при нагреве. ИТТ имеют высокую сорбционную способность к воде. Для исключения попадания влаги в образец из бетона образец покрывался слоем шамотной глины.

Для измерения температуры в экспериментах по конверсии в образце высверливались глухие отверстия диаметром 6 мм и глубиной 50 мм, в которые устанавливались термопары в корундовых чехлах. Располагались датчики температуры посередине межэлектродного промежутка с шагом 20÷30 мм перпендикулярно линии расположения электродов (рис. 17).

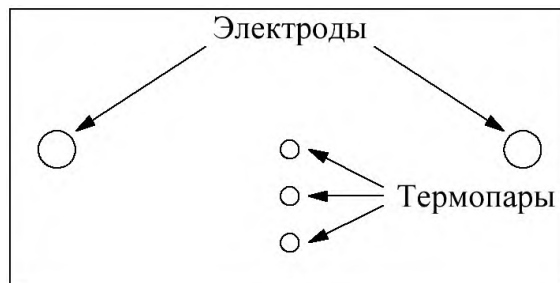


Рисунок 17 – Схема расположения термопар в образце.

Газообразные продукты конверсии через материальную линию, подключенную к экспериментальной камере, вводились в колонку газового хроматографа.

2.4. Расчёт нагрузочной характеристики экспериментальной установки

Ключевой особенностью электрофизической конверсии с точки зрения электрооборудования является весьма широкий диапазон необходимых токов и напряжений. При этом диапазон требуемых для исследования мощностей существенно уже. Таким образом, необходимо понимать максимальные значения требуемых тока и напряжения при некоторой постоянной мощности. Для качественного расчёта нагрузочной характеристики всей установки зададимся мощностью 3 кВт. При этом следует понимать, что в случае глубокой регулировки мощность не может быть рассчитана, как произведение максимального тока и напряжения. То есть при максимальном напряжении 10 кВ и токе 300 А по стандартной формуле ($P = U \cdot I$) мощность получится 3 МВт. Очевидно, что использование агрегата с такими параметрами не оптимально как минимум с точки зрения массогабаритных параметров и стоимости. При заданном диапазоне напряжений от 100 кВ до 10 В и постоянной мощности 3 кВт, согласно известной формуле $P = U \cdot I$ нагрузочная характеристика всего комплекса будет иметь вид, показанный на рисунке 18 пунктирной линией. Учитывая совокупные параметры всех силовых узлов лабораторного комплекса: максимальное напряжение 100 кВ, максимальный ток 264 А, обеспечиваемая нагрузочная характеристика будет иметь вид, показанный на рисунке 18 сплошной линией.

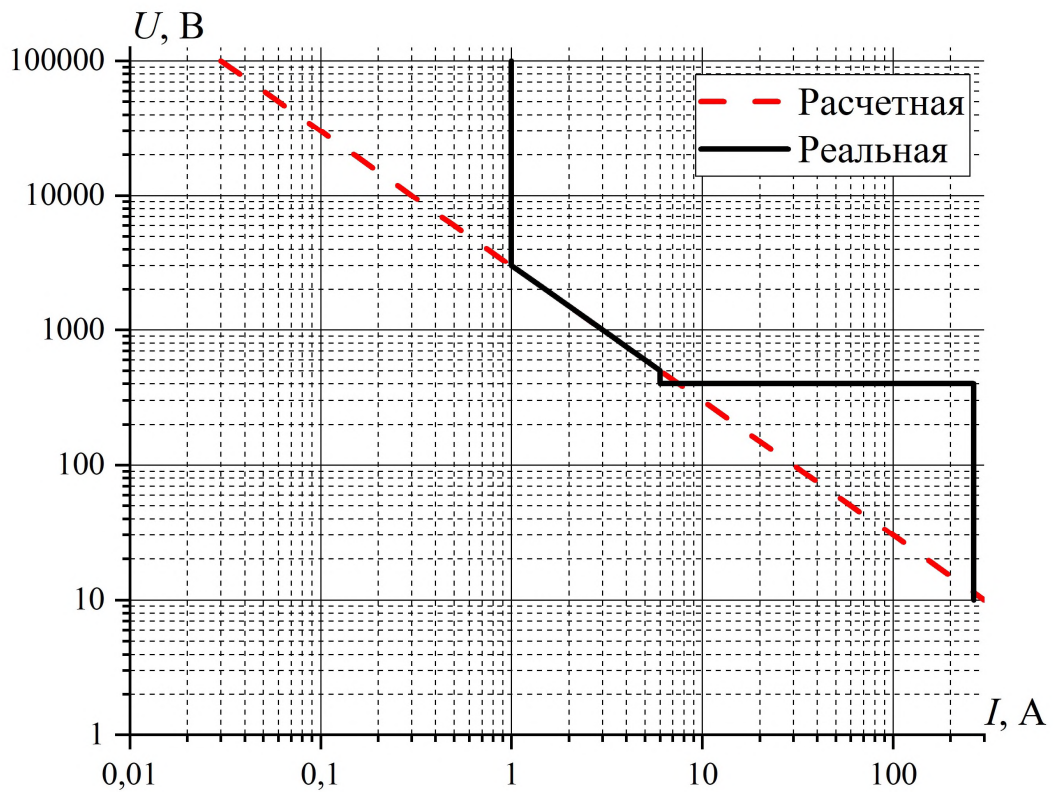


Рисунок 18 – Нагрузочная характеристика: пунктир – условный теоретический эталон, сплошная – реальная характеристика лабораторного комплекса.

Из представленных графиков видно, что реальная характеристика комплекса перекрывает весь диапазон, теоретически необходимых, токов и напряжений. Исключением является небольшая область в точке перехода от завершения формирования устойчивого проводящего канала к непосредственно нагреву и дальнейшей конверсии. Однако стоит учитывать, что мощность 3 кВт задана с избытком. К тому же на практике небольшое её снижение приведёт лишь к незначительному увеличению времени, необходимого для формирования устойчивого канала.

Выводы по главе

Лабораторный комплекс реализован по принципу поочередного включения трёх источников напряжения и обеспечивает рабочее напряжение до 100 кВ. При этом максимальная мощность наименее мощного звена 3 кВт. Максимальный ток, используемый для нагрева 264 А. Обеспечена глубокая плавная регулировка напряжения.

Измерения параметров ЧР осуществляются регистрацией тока через образец. Используемая схема соответствует рекомендациям международного стандарта ИЕС 60270:2000(Е). Коаксиальное исполнение всех измерительных элементов обеспечивает максимальную помехозащиту и минимальные паразитные параметры. Собственные (внутренние) ЧР лабораторного комплекса не регистрируются измерительной цепью до напряжения 5 кВ. Коронный разряд возникающий при напряжениях от 5 кВ обладает интенсивностью пренебрежимо малой по сравнению с полезным сигналом при этом напряжении.

Нагрузочная характеристика лабораторного комплекса обеспечивает весь теоретически необходимый диапазон, за исключение весьма небольшой области на стадии перехода от формирования стабильного канала к продуктивному нагреву. При использовании кратковременной и несущественной перегрузки среднего звена эта область становится доступной на практике. Такая перегрузка заложена в расчёт высоковольтного трансформатора. С помощью лабораторного комплекса можно осуществить полный цикл конверсии при различных температурных градиентах для образцов объёмом до 2 дм³.

Глава 3. Лабораторные исследования электрофизической конверсии ископаемых твёрдых топлив, на примере горючих сланцев месторождения Хуадянь (Китай)

3.1 Микроскопическое исследование горючих сланцев месторождения Хуадянь (Китай)

Структура материала существенным образом влияет на его свойства, в том числе электрическую прочность и теплопроводность. Также эффекты и явления, возникающие в материале под действием ВН, во многом определяются микроструктурой. Так, например, проводимость резко неоднородных материалов выше, чем однородных [43]. В гетерогенных материалах локальный теплообмен имеет различную интенсивность. В итоге, вероятность теплового пробоя увеличивается. При этом наличие в материале газовых включений или кристаллов, включённых в аморфную матрицу, создаёт концентраторы напряженности электрического поля. Вследствие возникновения локального повышения напряженности инициируются ЧР [43,47,48]. ЧР в свою очередь являются основным фактором электрической деградации материала. Таким образом, для исследования эффектов, вызываемых в материале высоким напряжением, его необходимо изучить и характеризовать. Объектом лабораторных экспериментов были ГС Хуадяньского месторождения провинции Цзилинь (Китай). Структура ГС резко неоднородна и гетерогенна по причине осадочного, а, следовательно, стохастического, диагенеза. Укрупнённо составляющие можно разделить на: органические компоненты (аморфные), минеральные (кристаллические) и газовые поры нано- и микроразмеров [п. 1.2.1].

Исследования морфологии поверхности слома и микроанализ элементного состава горючих сланцев осуществлялись растровым электронным микроскопом *LEO1455VP* детектором отраженных электронов при ускоряющем напряжении 20 кВ. Для микроскопии подготавливался именно слом, т.к. порода обладает низкой твердостью, высокой сорбционной способностью к жидкостям, существенной склонностью к окислению кислородом воздуха, при всём этом сама по себе содержит большое количество разнородных включений. Таким образом, подготовка шлифа не обеспечивает корректности полученных микрофотографий. Результаты микроскопии представлены на рисунках 19 и 20.

На микрофотографии ГС (рис. 19) отчётливо видны микропоры и микротрещины. Также выделяются светлые включения пирита (FeS_2). Снимок выполнен в отражённых электронах поэтому кристаллические включения более светлые за счёт более плотной упаковки атомов. ГС

Хуадяньского месторождения содержат большое количество органики, поэтому основной фон представлен органической матрицей, в связи с чем более тёмный. Отчётливо прослеживается слоистость породы, на фотографии слои ориентированы вертикально. Дополнительные материалы по микроскопии представлены в приложении 1.

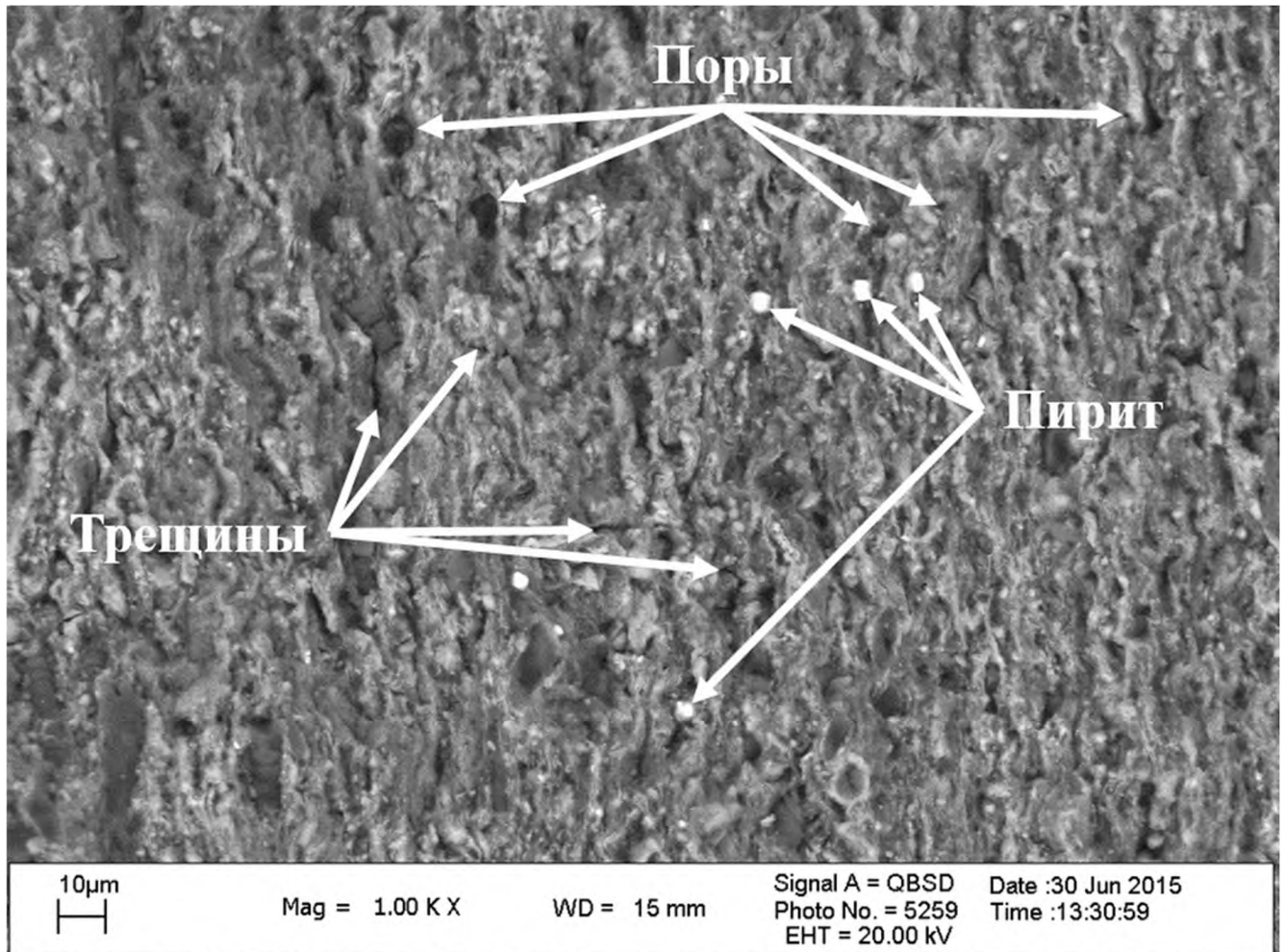


Рисунок 19 – Микрофотография ГС Хуадяньского месторождения. Обозначены микропоры, микротрещины и минеральные кристаллические включения пирита, основной фон органическая матрица.

Микрофотография (рис. 20) демонстрирует сразу три разнородных фрагмента (спектры 18, 19, 20). Сами спектры приведены в таблице 10.

В спектре 18 преобладает углерод, кислород и кальций. Это включение кальцита (CaCO_3), весьма распространённого в осадочных породах, особенно сапропелитового характера. Помимо растворённого в воде кальция из этого минерала состоят раковины организмов, которые среди прочих послужили осадочным материалом. На фотографии (рис. 20) видны очертания этой раковины.

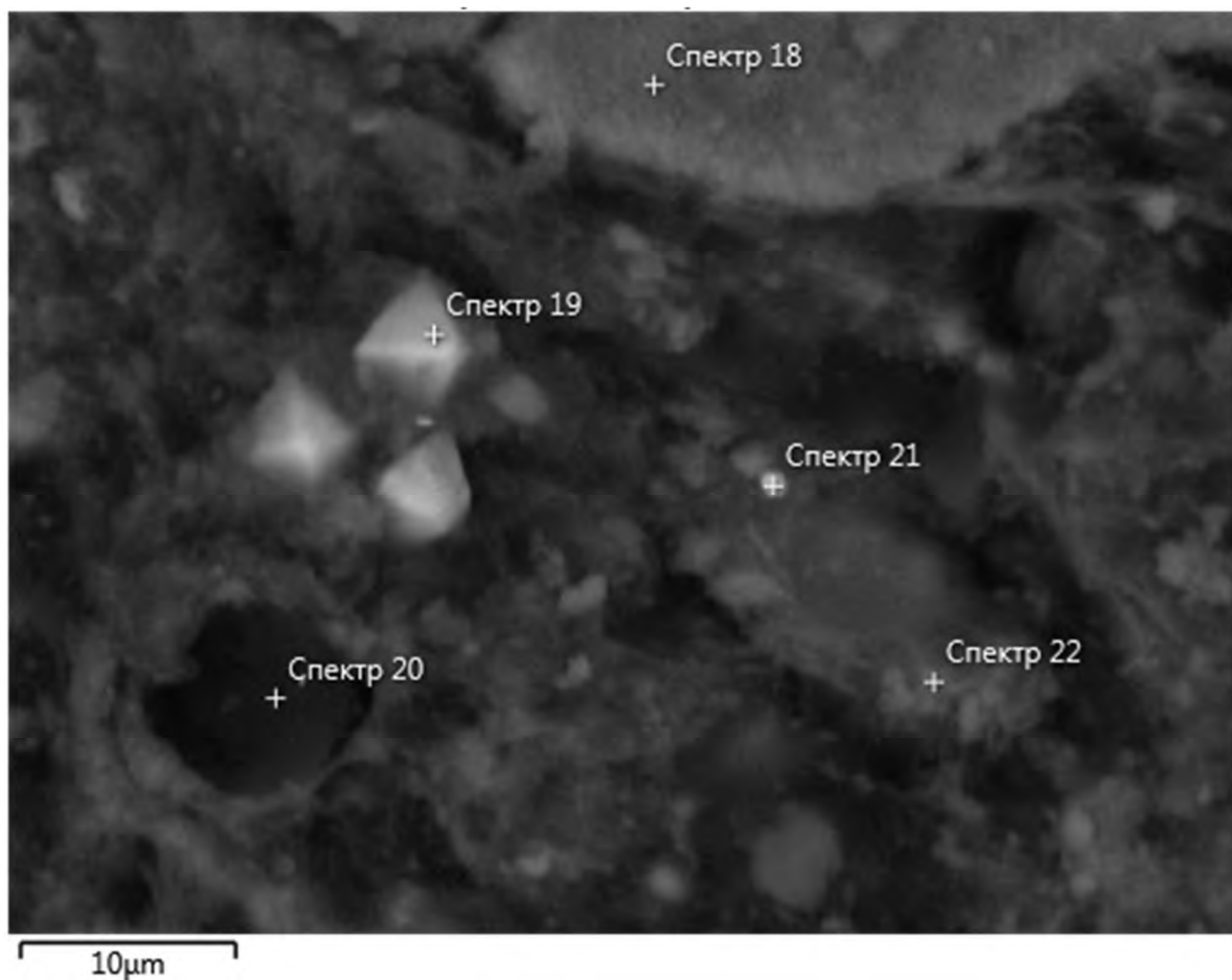


Рисунок 20 – Микрофотография ГС Хуадяньского месторождения, наиболее явно демонстрирующая наличие различных материалов в структуре, с обозначением диагностированных спектров.

Таблица 10 – Спектры, указанные на рисунке 20.

Элемент		С	О	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Mo	Сумма
Спектр													
18	Вес. %	39,50	34,56	0,21	0,32	1,51	3,75	0,17	0,18	18,15	1,66	-	100,00
	Сигма Вес. %	0,56	0,51	0,05	0,04	0,06	0,08	0,03	0,04	0,23	0,10	-	
	Атом. %	53,45	35,11	0,15	0,21	0,91	2,17	0,09	0,07	7,36	0,48	-	100,00
19	Вес. %	39,04	5,04	-	-	0,33	0,50	27,27	-	0,24	24,48	3,11	100,00
	Сигма Вес. %	0,83	0,29	-	-	0,04	0,04	0,44	-	0,05	0,42	0,61	
	Атом. %	66,03	6,40	-	-	0,25	0,36	17,28	-	0,12	8,90	0,66	100,00
20	Вес. %	81,22	12,93	-	-	0,56	1,61	-	-	3,68	-	-	100,00
	Сигма Вес. %	0,70	0,71	-	-	0,07	0,09	-	-	0,15	-	-	
	Атом. %	87,36	10,44	-	-	0,27	0,74	-	-	1,19	-	-	100,00
21	Вес. %	44,05	12,99	-	-	0,81	2,27	17,06	-	0,66	19,06	3,11	100,00
	Сигма Вес. %	1,41	0,75	-	-	0,10	0,13	0,56	-	0,09	0,64	0,98	
	Атом. %	66,53	14,73	-	-	0,54	1,47	9,65	-	0,30	6,19	0,59	100,00
22	Вес. %	26,99	44,75	-	0,66	4,26	9,33	-	0,91	11,77	1,32	-	100,00
	Сигма Вес. %	1,23	0,98	-	0,10	0,17	0,27	-	0,10	0,32	0,18	-	
	Атом. %	38,07	47,39	-	0,46	2,68	5,63	-	0,39	4,97	0,40	-	100,00

Спектры 19 и 21 принадлежат пириту (FeS_2), так же часто встречающемуся в ИТТ в виде включений. На фотографии (рис. 20) отчётливо видна кристаллическая форма и светлый окрас.

Спектр 20 показывает в основном углерод и кислород, что указывает на некоторый органический фрагмент. Включение, которому принадлежит этот спектр наиболее темное, т.е. имеет малую атомарную массу.

Область, которой принадлежит спектр 22 явно в основном состоит из органики, но уже с примесями глинистых минералов. В связи с чем к углероду и кислороду добавляется алюминий, кремний и кальций.

Отклонения от стехиометрического состава обозначенных минералов и наличие примесных атомов вызвано неидеальной фокусировкой электронного пучка и его попаданием на соседние атомы.

Таким образом, микроскопия ГС показала наличие большого количества микропор и микротрещин, различного размера. Помимо этого, присутствие в органической матрице кристаллических включений пирита и кальцита, а также рассеянных глинистых минералов. В итоге структура ГС Хуадяньского месторождения весьма неоднородна и гетерофазна, с большим содержанием органической компоненты, также наблюдается слоистость присущая сланцам. Электрическое поле в таком материале однозначно будет приобретать неоднородный характер, концентрируясь на газонаполненных порах и трещинах, а также на кристаллических «острийных» структурах. Слоистость породы приводит к увеличению проводимости вдоль слоёв.

3.2. Исследование элементного состава горючих сланцев месторождения Хуадянь (Китай)

На ряду со структурой материала, в особенности композитного, на его характеристики, в том числе электрофизические, влияют свойства отдельных компонент. Помимо газонаполненных пор и трещин, и аморфного органического вещества в ГС, как и в ИТТ в целом присутствуют минеральные кристаллические компоненты. При этом свойства этих компонент весьма разнообразны. Электрофизические свойства ИТТ непосредственно зависят от зольности, которая в свою очередь напрямую коррелирует с содержанием минеральной компоненты в породе. Причём для пород с разной степенью метаморфизма это влияние различно, в том числе по знаку [41]. Поэтому важно понимать фазовый состав исследуемого материала, в частности ГС.

В качестве одного из способов изучения фазового состава использовался косвенный метод определения содержания тяжелых элементов. Количественный элементный состав горючих сланцев определялся атомно-эмиссионной спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре *iCAP 6300 Duo, Thermo Scientific*. Результаты приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Концентрация тяжелых элементов в горючих сланцах Хуадяньского месторождения.

№ п/п	Элемент	Проба 1, мг/кг	Проба 2, мг/кг	Проба 3, мг/кг	Проба 4, мг/кг	Проба 5, мг/кг	Среднее по 3-5, мг/кг
1	Si	60700	132900	110260	104060	104560	106293,333
2	Ca	166600	51620	49140	36750	39810	41900
3	Al	7790	38610	26790	16700	19420	20970
4	Fe*	11480	17620	21980	21890	21760	10938,333
5	K	1025	8210	6156	5567	6066	5929,667
6	Mg	91190	8310	4904	4941	5426	5090,333
7	Na	931,7	4147	3692	3394	3588	3558
8	Ti	380,3	1675	1715	1688	1712	1705
9	Mn	893,1	614,7	581	579	572	577,333
10	Zr	16,09	51,27	343	308	347	332,667
11	Ba	181,9	554,1	338	317	341	332
12	Sr	200,2	479,8	305	295	296	298,667
13	P	1242	1780	278	356	206	280
14	Zn	20,65	61,05	56,3	54,1	53,8	54,733
15	Ni	7,091	33,3	30,7	67,1	29,2	42,33
16	V	18,04	43,14	33,9	33,5	33,8	33,733
17	Cr	14,43	168,2	31,1	33,2	33,3	32,533
18	B	27,61	33,23	41,4	12,6	20,1	24,7
19	Li	54,25	28,37	26,3	22,3	24,3	24,3
20	Cu	5,709	18,88	18,4	16,7	17,99	17,697
21	Co	9,914	10,76	12,1	11,8	11,9	11,933
22	Pb	6,05	8,671	9,95	10,1	9,96	10,003
23	Mo	0,559	3,868	1,28	1,24	1,28	1,267
24	Cd	0,51	0,837	0,95	1,03	0,99	0,99
25	W	690,6	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0
26	As	27,61	32,52	<0,1	<0,1	<0,1	0
27	Ag	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0
28	Be	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0
29	Bi	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0
30	Sb	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0
31	Se	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0
32	Sn	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0
33	Te	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0

Пробы 1 и 2 взяты для оценки диапазона локальных концентраций элементов, крупного помола в стакане из карбида вольфрама и железа соответственно. Пробы 3, 4, 5 взяты для получения средних значений концентраций, мелкого помола в железном стакане с

перемешиванием. Сравнение первой и второй проб по Fe показывает, что железо привнесено из стакана в количестве $\sim 50 \text{ \%}$ * от исходного значения. Вольфрам присутствует только в первой пробе, то есть полностью привнесен из стакана.

Основные минеральные компоненты, составляющие ГС: кварц, силикаты и алюмосиликаты (слюды, полевые шпаты, глины и т.д.), карбонаты (кальцит, магнезит, сидерит, доломит и т.д.), сульфиды (в основном пирит, но также марказит, халькопирит и др.). В составе преобладает кремний, т.к. является компонентом кварца, силикатов и алюмосиликатов, наличие последних обуславливает высокое содержание алюминия. Слюды, полевые шпаты и глины в свою очередь содержат Ca, Fe, K, Mg, Na в качестве как компонент структуры, так и примесей, а глины могут содержать эти металлы в виде сорбированных катионов. Также высокое содержание карбонатов приводит к повышенным концентрациям Ca, Fe, Mg. При этом железо входит в состав пирита (FeS_2), наиболее часто встречающегося сульфида. Относительно высокая концентрация титана свидетельствует о присутствии рассеянного TiO_2 , который часто содержится в осадочных породах, в основном в форме рутила. Результаты спектрометрии тяжёлых элементов коррелируют с литературными данными рентгенофазовых анализов минеральной компоненты Хуадяньских сланцев [28]: глины – 31-49 %, кварц – 32-45 %, кальцит – до 28 %, полевые шпаты – 3-10 %, пирит – 2-5 %.

Кварц и полевые шпаты наиболее инертные минералы, относящиеся к диэлектрикам, с низкой полярностью. С точки зрения электрофизических свойств не имеют ярко выраженных особенностей. Но при этом кварц в присутствии воды с растворёнными ионами может создавать жидкий диффузный слой с избыточным положительным зарядом [38].

Глины представляют собой минералы, относящиеся к алюмосиликатам. Обладают слабой проводимостью и за счет специфики строения частицы глин обладают поверхностным зарядом [38]. Это обуславливает их высокие сорбционные свойства по отношению к воде и, растворённым в ней, катионам металлов. Глинистые минералы теряют электронейтральность вследствие гетеровалентного изоморфизма, который происходит с высокой степенью вероятности [39]. В итоге диэлектрическая проницаемость глин существенно выше большинства минеральных диэлектриков. Из-за описанных специфических свойств глинозём влияет на микроструктуру вмещающей породы качественно и количественно.

Карбонаты являются минеральными диэлектриками, в сравнении с кварцем и полевыми шпатами, обладают повышенной проводимостью и диэлектрической проницаемостью. В воде в присутствии углекислого газа образуют гидрокарбонаты, могут окисляться в присутствии кислорода и влаги. Многие карбонаты хорошо подвержены растворению в воде, образуя рассол.

Пирит обладает высокой проводимостью, физически относится к полупроводникам и имеет высокую диэлектрическую проницаемость. Небольшие количества этого минерала в ИТТ могут привести к преодолению перколяционного порога. Содержание 10 % FeS_2 превращает породу в проводник [37].

Стоит отметить, что степень и качество влияния присутствия глин, карбонатов и кварца на свойства породы существенно зависит от присутствия воды. При этом нагрев ГС, а, следовательно, и их глиняных компонент приводит к выделению воды из последних. Это влечёт динамическое изменение свойств породы [45].

Выполненный анализ относится к минеральной компоненте породы и не применим к органической. Однако её влияние на совокупные свойства ГС также стоит учитывать. Органическая компонента сланцев, как и подавляющего большинства ископаемых твёрдых топлив, представляет собой нерегулярные высокомолекулярные соединения углеводородной природы. Для примера можно рассмотреть эмпирические формулы органического вещества ИТТ по существу учитывающие лишь соотношения элементов [30, 41, 42]: $\text{C}_{99}\text{H}_{89}\text{N}_2\text{SO}_9$, $\text{C}_{421}\text{H}_{638}\text{O}_{44}\text{S}_4\text{NCl}$, $\text{C}_{102}\text{H}_{78}\text{O}_{10}\text{N}_2$. В составе присутствуют гидроксильные и карбоксильные группы и гетероатомные соединения. Проводимость такого материала, по аналогии с углеводородными полимерами низка. При этом OH и COOH группы создают локальный избыточный заряд, оказывающий влияние на процессы, вызванные воздействием ВН на породу и, следовательно, на свойства материала в целом.

Свойства компонент минеральной составляющей ИТТ, имеют большой количественный диапазон и существенные качественные отличия. Минералы в ГС представлены как диэлектриками, так и проводниками, при определённых условиях проявляют полупроводниковые, а некоторые обладают ионообменными свойствами. В условиях низкой проводимости органической компоненты минеральная привносит примесную проводимость. Молекулы органической составляющей ГС весьма тяжелые, длинные и нелинейные в присутствие гетероатомных соединений, гидроксильных и карбоксильных групп это может вызывать возникновение значительного дипольного момента при воздействии электрического поля. Такая многокомпонентная система подвержена существенной поляризации, особенно в области низких частот. При этом существенную роль играют стохастически определённые сопряжения разнородных материалов. Стоит отметить, что локальные и совокупные свойства породы будут подвержены динамическим изменениям при протекании через неё тока и локальном нагреве, вследствие присутствия сорбированной и конституционной воды.

3.3. Инициация частичных разрядов в ископаемых твёрдых топливах, на примере горючих сланцев месторождения Хуадянь (Китай)

В качестве основных механизмов формирования проводящего канала в НИТТ рассматриваются тепловой пробой и пробой вследствие электрической деградации, которая в существенной степени связана с интенсивностью ЧР в материале. Важным параметром ЧР и, как следствие, процесса деградации является напряжение возникновения ЧР и, соответственно, начала процесса интенсивной электрической деградации. Этот параметр измерялся с применением лабораторного комплекса для исследования электрофизической конверсии. Использовалась схема измерения тока через образец для регистрации ЧР и измерения их параметров. В результате были зафиксированы начальные ЧР (рис. 21) и напряжение их возникновения (табл. 11). Дополнительные осциллограммы приведены в приложении 2.

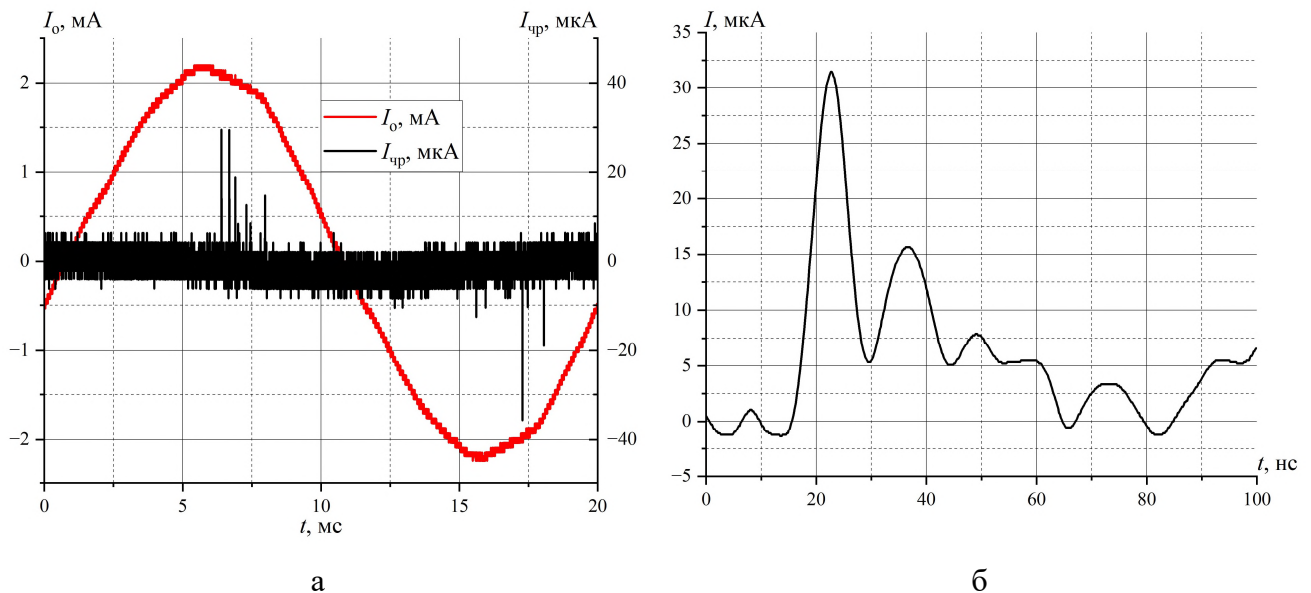


Рисунок 21 – Характерные осциллограммы регистрируемых токов: а – суммарный ток через образец (I_0) и то же с отфильтрованной низкочастотной составляющей ($I_{\text{чр}}$), б – ток единичного ЧР [62].

Напряжение и напряженность возникновения ЧР от межэлектродного расстояния, и, соответственно, средней напряженности между электродами зависит слабо, что видно из таблицы 12. Напряжение возникновения возросло на $\sim 30\%$, а напряженность возникновения снизилась в ~ 3 раза с увеличением межэлектродного расстояния в ~ 4 раза. При этом величина кажущегося заряда практически не изменилась.

Этот феномен вызван несколькими обстоятельствами. Во-первых, ИТТ крайне неоднородный слабопроводящий материал. Следовательно, распределение напряжения

происходит главным образом по наименее проводящим областям и слабо зависит от средней напряжённости. Во-вторых, вследствие высокой степени микронеоднородности происходит сильное обострение электрического поля. В совокупности с локальной проводимостью, основная часть напряжения может прикладываться к относительно небольшим участкам. С учётом размеров пор от десятков нанометров, результирующая напряжённость может быть высокой.

Таблица 12 – Данные полученные в экспериментах по инициации ЧР.

Серия 1				Серия 2			
$U_{\text{чр}}, \text{В}$	$L, \text{мм}$	$E_{\text{чр}}, \text{В/мм}$	$q_0, \text{пКл}$	$U_{\text{чр}}, \text{В}$	$L, \text{мм}$	$E_{\text{чр}}, \text{В/мм}$	$q_0, \text{пКл}$
500	51	9,8	0,34	860	210	4,1	0,97
530	54	9,8	0,24	590	192	3,1	0,52
570	49	11,6	0,67	850	202	4,2	0,65
500	45	11,1	0,54	850	204	4,2	0,44
640	50	12,8	0,43	800	198	4,0	0,81
610	51	12,0	0,22	820	200	4,1	0,36
500	45	11,1	0,92	760	205	3,7	0,28
500	46	10,9	0,3	820	203	4,0	0,41
750	52	14,4	0,51	Среднее			
700	55	12,7	0,5	793,75		3,9	0,6
Среднее							
580		11,6	0,5				

$U_{\text{чр}}$ – напряжение возникновения ЧР, L – расстояние между электродами, $E_{\text{чр}}$ – средняя напряженность возникновения ЧР, q_0 – единичный заряд начальных ЧР.

Минеральные компоненты ГС можно условно поделить на диэлектрики и проводящие материалы. К диэлектрикам относятся: кварц, полевые шпаты и карбонаты (преимущественно кальцит). К проводящим материалам относятся глины и сульфиды (преимущественно пирит). Сопротивление пирита весьма низко. Глины обладают поверхностным зарядом за счет специфического строения [39]. Какая-то доля глинистых частиц не электронейтральна в связи с гетеровалентным изоморфизмом [40]. Поэтому глины имеют поверхностную проводимость и высокую сорбционную способность по отношению к воде и катионам металлов. Последние обладают высокой подвижностью вдоль слоев, образованных кристаллами глинистых минералов.

Кроме минеральных компонент, в сланцах присутствует органическое вещество (кероген). Органическая компонента ГС является диэлектриком с гетероатомными примесями, в том числе полярными ОН и СООН. Последние в свою очередь имеют непосредственное влияние на накопление и распределение заряда в породе под действием напряжения.

Горючие сланцы имеют стохастическое распределение сопряжений компонент породы и их локальных концентраций вследствие осадочного генезиса. В такой системе заряд накапливается на границе раздела фаз с различными σ и ϵ при воздействии электрического поля,

то есть возникает эффект Максвелла-Вагнера [38, 62]. Условие возникновения этого эффекта [63]:

$$\sigma_1 \cdot \varepsilon_2 \neq \sigma_2 \cdot \varepsilon_1 \quad (1)$$

где ε_1 , ε_2 – диэлектрическая проницаемость соответствующего вещества; σ_1 , σ_2 – проводимость соответствующего вещества. Из таблицы 7 и 8 следует, что существенная часть сопряжений различных фаз в ГС удовлетворяет этому условию. Так, например, проводимость кварца $\sim 10^{-14}$, его диэлектрическая проницаемость ~ 5 , соответствующие параметры пирита $\sim 10^1$ и ~ 50 . Разница левой и правой части выражения составляет 14 порядков.

Аналогичный механизм искажения поля рассматривается в емкостной модели замещения диэлектрика с включениями. При условии существенно меньшего, чем основной объём диэлектрика, размера включения отношение локальной и средней напряженностей электрического поля прямо пропорционально отношению диэлектрических проницаемостей основного объёма диэлектрика и вещества включения [48]:

$$\frac{E_{\text{вкл}}}{E_{\text{ср}}} \cong \frac{\varepsilon_{\text{д}}}{\varepsilon_{\text{вкл}}} \quad (2)$$

где $E_{\text{вкл}}$ – напряженность электрического поля на границе раздела фаз; $E_{\text{ср}}$ – средняя напряженность электрического поля, приложенного к материалу; $\varepsilon_{\text{д}}$ – диэлектрическая проницаемость основного объема диэлектрика; $\varepsilon_{\text{вкл}}$ – диэлектрическая проницаемость вещества включения. Под действием напряжения в горючих сланцах возникает структурная поляризация в связи со спецификой строения и состава. Она определяет высокое значение диэлектрической проницаемости на частотах до сотен герц [38]. Наиболее существенное влияние оказывают сорбированная вода ($\varepsilon \sim 80$), содержащая катионы металлов, и пирит ($\varepsilon = 33 \div 81$). Диэлектрическая проницаемость ископаемых твёрдых топлив на промышленной частоте относительно высокая и для горючих сланцев Хуадяньского месторождения составляет 20-30 [23, 64]. Этот параметр для газа составляет ~ 1 . Вследствие осадочного генезиса газонаполненные включения в виде микропор, микротрещины и т.д. неизбежно присутствуют в породе [35]. Учитывая отношение их размера к основному объёму и соотношение 2, напряженность поля в этих включениях превышает среднюю минимум на порядок. В итоге они рассматриваются в качестве основных эпицентров возникновения частичных разрядов [46, 48]. Наиболее существенно этот эффект проявляется на сопряжении газонаполненной полости с проводящими, т.е. пиритовыми и глинистыми, включениями.

Структура и размер отдельных включений так же оказывает влияние на искажение электрического поля в горючих сланцах. Неотъемлемым процессом генезиса осадочных пород является накопление обломочного материала и образование кристаллических структур. Поэтому

в сланцах присутствуют острийные структуры (рис 6, 20), радиусы скругления которых имеют микро- и наноразмеры [34, 35]. В связи с высокой проводимостью некоторых кристаллических минералов (пирит, глины) происходит увеличение напряжённости поля на острие, по аналогии с электродной системой остриё плоскость [65]:

$$E_M \cong \frac{2sE_{cp}}{r \cdot \ln\left(1 + \frac{4s}{r}\right)} \quad (3)$$

где E_M – максимальная напряженность электрического поля на острие; E_{cp} – средняя напряженность электрического поля; s – расстояние между электродами; r – радиус скругления.

Описанные механизмы искажения электрического поля в горючих сланцах происходят на микроуровне, однако на формирование резко неоднородной структуры поля влияет и макроструктура породы. Минеральная компонента ископаемых твёрдых топлив имеет полупроводящие свойства [41]. По этой причине проводимость пород со степенью метаморфизма ниже, чем у антрацита, в том числе горючих сланцев, повышается с увеличением зольности. Помимо этого, наличие проводящих включений, например, пирита, в концентрации 5-10 % может вызвать преодоление перколяционного порога [37], т.е. на несколько порядков увеличить проводимость породы, вследствие сквозного контакта частиц между собой. Если рассматривать отдельные фрагменты породы, то этот эффект имеет высокую степень вероятности, т.к. пирит зачастую присутствует в горючих сланцах в виде протяженных прожилок (рис. 5). Таким образом, основное падение напряжения происходит на более высокоомных фрагментах породы. Степень метаморфизма Хуадяньских сланцев низкая в тоже время эта порода обладает высокой зольностью (50-70 %). К проводящим включениям кроме пирита относятся глинистые минералы содержание которых достигает 45 %. В итоге при приложении электрического поля к породе, основная часть напряжения, распределяется по фрагментам с наименьшей проводимостью, создавая на них напряженность превышающую среднюю расчетную.

Воздействие электрического поля на горючие сланцы приводит к накоплению локального заряда по причине синергии различных эффектов. Эти эффекты возникают вследствие специфического состава и строения породы. Как следствие, напряжение и напряженность возникновения ЧР в горючих сланцах имеют аномально низкие значения. Напряженность возникновения составляет 11,6 В/мм и 3,9 В/мм для межэлектродных расстояний ~50 мм и ~200 мм соответственно. Этих характеристики ЧР даже в состаренной гетерогенной изоляции минимум на порядок выше [66]. К основным механизмам искажения поля относятся:

- Накопление носителей заряда на границе раздела материалов с различной проводимостью и диэлектрической проницаемостью, т.е. эффект Максвелла-Вагнера

- Увеличение напряжённости электрического поля на микровключениях с низкой диэлектрической проницаемостью
- Увеличение локальной напряженности на структурах типа острий
- Неравномерное падение напряжения по объему породы, из-за различной проводимости отдельных её фрагментов.

Сильное искажение поля приводит к возникновению высоких локальных напряженностей несмотря на низкий уровень напряжения и относительно большое межэлектродное расстояние. По этой причине существенное (в ~ 4 раза) увеличение межэлектродного расстояния привело к непропорциональному росту напряжения возникновения (на $\sim 30\%$). Напряженность возникновения сильно снизилась (в ~ 3 раза), т.к. она прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна расстоянию. С точки зрения практики применения электрофизической конверсии это даёт основания предполагать, что инициация формирования проводящего канала в породе потребует относительно низкого напряжения, даже при больших межэлектродных расстояниях.

3.4. Пробой и формирование проводящего канала в ископаемых твёрдых топливах

Цель воздействия высокого напряжения на ИТТ – пробой, т.е. формирование проводящего канала в объёме породы. Для технологических применений необходимо определить напряжения и напряжённости пробоя. Главным образом из-за высокой, относительно диэлектриков, проводимости и стохастически сложенной неоднородной и нерегулярной структуры, пробой в объёме твёрдых топлив происходит при весьма низких, в сравнении с изоляционными материалами напряжённости и напряжениях. С помощью лабораторного комплекса была определена зависимость параметров пробоя от межэлектродного расстояния в некоторых ИТТ (Рис. 22) [67].

На графиках (Рис. 22) наблюдается тенденция слабого увеличения напряжения и резкого снижения напряженности пробоя при существенном увеличении межэлектродного расстояния. При этом для горючих сланцев в диапазоне расстояний до ~ 20 см изменения сильнее, чем при больших расстояниях, особенно отчётливо это наблюдается на напряжённости. Это связано с распределением напряжения по наиболее высокоомным областям породы. Количество таких участков с увеличением длины образца прирастает незначительно. Напряжение распределяется по относительно небольшим областям, и локальная напряженность существенно превышает

среднюю. Наиболее отчётливо эта тенденция наблюдается для горючих сланцев, в связи с большим диапазоном межэлектродных расстояний.

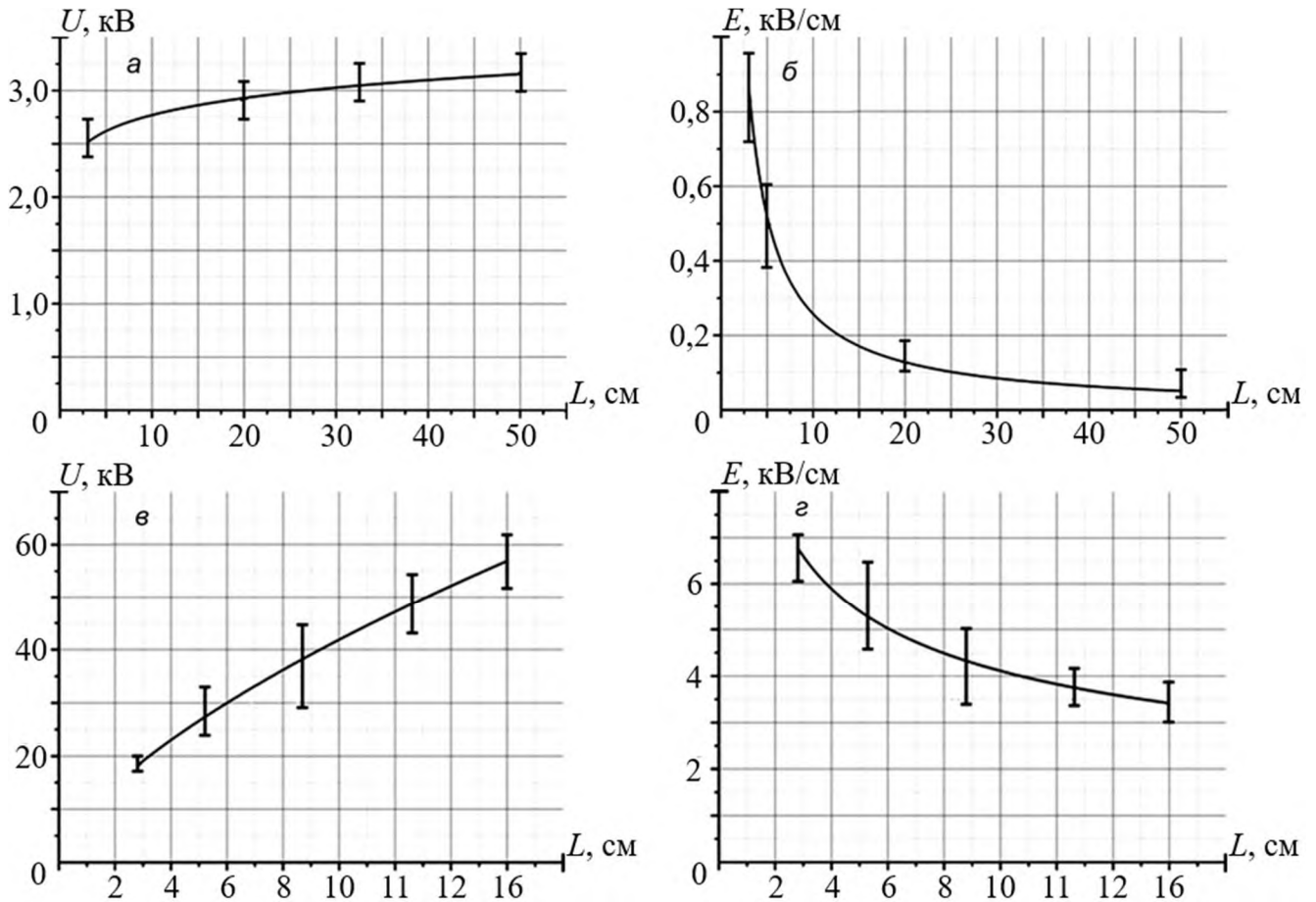


Рисунок 22 – Зависимость напряжения (а, в) и средней напряженности (б, г) пробоя горючих сланцев (а, б) и бурых углей (в, г) от межэлектродного расстояния [67].

В результате пробоя формируется низкоомный канал. На рисунке 23 приведена фотография демонстрирующая канал пробоя и сопутствующие дендриты вдоль слоёв образца. Главным образом сопротивление падает за счёт увеличения локальной концентрации углерода (карбонизации) при воздействии высоких температур. Карбонизация в сквозном канале происходит из-за протекания тока через малое сечение и, следовательно, высокой удельной выделяемой энергии.

При воздействии ВН на образец процесс пробоя сопряжен с процессом образования дендритов вследствие ЧР. Разрядные структуры так же подвержены карбонизации из-за высокой локальной температуры плазмы ЧР. Распределены дендриты стохастически и не все из них принадлежат основному каналу пробоя. На рисунке 24 приведена микрофотография дендрита, полученная с помощью оптического микроскопа.

Карбонизированный объём имеет низкое удельное сопротивление $10^{-1} \div 10^1$ Ом·см. При протекании достаточного тока с течением времени карбонизации подвергается всё больший

объём. В итоге проводящий канал расширяется, а на его границе образуется переходная область между карбонизированным объёмом и исходной породой (Рис. 25).



а



б

Рисунок 23 – Фотография образца, расщеплённого вдоль слоёв после пробоя (а), тоже с увеличенной резкостью в области канала пробоя и дендритов (б). Выдержка при 2,5 кВ 100 мин, с дальнейшим увеличением напряжения до пробоя – 3 кВ.



Рисунок 24 – Фотография дендрита через оптический микроскоп. Напряжения пробоя образца 2,2 кВ, межэлектродное расстояние 68 мм.



Рисунок 25 – Фотография образца горючих сланцев, подвергнувшегося частичной конверсии.

ИТТ как материал неустойчив к воздействию высоких температур. Карбонизация происходит ещё на стадии формирования дендритов. Некоторая часть дендритов в совокупности с низкоомными участками образуют сквозной низкоомный канал. В связи с малым сечением этого канала выделяемая в нём удельная мощность высока и влечёт сильный нагрев и интенсивную карбонизацию. Это приводит к формированию устойчивого низкоомного канала в объеме породы.

3.5. Продукты, получаемые при различных режимах электрофизической конверсии горючих сланцев месторождения Хуадянь (Китай)

Прикладной смысл формирования проводящего канала в ИТТ заключается в нагреве породы джоулевым теплом с целью термохимического превращения высокомолекулярной органической компоненты в более лёгкие газообразные и жидкие продукты. Электрофизический способ конверсии позволяет в существенной степени управлять процессом преобразования регулируя параметры воздействия на породу. С технической точки зрения основными параметрами являются скорость нагрева породы и максимальная температура. В свою очередь они непосредственно связаны с вводимой мощностью и её динамикой, с учётом динамического снижения сопротивления породы. При этом стоит учитывать, что, нагрев породы за счёт проводящего канала имеет особенности, отличающие его от классического ретортинга. Они заключаются в разнонаправленности тепломассопереносов этих способов. Наиболее

традиционный способ подземной переработки ИТТ, дутьевая газификация, имеет схожие направления распространения тепловых и массовых потоков. Но и у неё есть отличительные особенности. Во-первых, само дутьё непосредственным образом участвует в химических реакциях. Во-вторых, дутьевая технология предполагает наличие принудительного газодинамического потока, создаваемого в пласте. Таким образом, наиболее изученные способы не дают достаточную научно-техническую базу для теоретического моделирования термохимических превращений в процессе электрофизической конверсии, которое в любом случае необходимо подтверждать экспериментально. В связи с этим необходимо изучить зависимость состава получаемых продуктов от скорости нарастания вводимой мощности и её максимального значения.

Для изучения влияния параметров электрофизического воздействия фрагменты породы с установленными в них электродами помещались в герметичную камеру, которая вакуумировалась и заполнялась азотом под давлением 3 атм.

Высокоскоростная конверсия

К образцу подводилась мощность 2 кВт в течении 4 часов. В результате произошло частичное разрушение образца с испарением и последующей конденсацией твёрдой фазы на внутренних поверхностях камеры (рис. 26).



Рисунок 26 – Образец в экспериментальной камере после конверсии.

Газообразные продукты анализировались хроматографом, описанным в методической главе. Состав полученного газа: H_2 – 51%; CO – 31%; CH_4 – 11%; CO_2 – 7%.

Жидкие продукты подвергались качественному анализу четырех полученных фракций сланцевой нефти методом газовой хроматографии/масс-спектрометрии на газовом хроматографе *Agilent 7890A* с селективным квадрупольным масс-детектором. Температура начальная – 70°C в течение 5 минут, скорость нагрева – 10°C/мин, температура конечная – 270°C в течение 7 минут. Идентификацию компонентов проводили, сравнивая полученные масс-спектры со стандартной библиотекой масс-спектров веществ.

При разделении использовали н-гексан марки "х.ч.", толуол марки "х.ч.", метанол марки "х.ч." и дихлорметан марки "х.ч.", без предварительной очистки. Оксид алюминия (Al_2O_3) активировали прокаливанием в муфельной печи 2 часа при 150°C. Общая схема разделения пробы жидких продуктов конверсии представлена на рисунке 27.

В результате выделено 2 основных фракции в следующей массовой пропорции: асфальтены (включая золу) – 55 %, мальтены – 45 %. Мальтены состоят из углеводородов, ароматических соединений двух групп растворимости, полярных соединений.

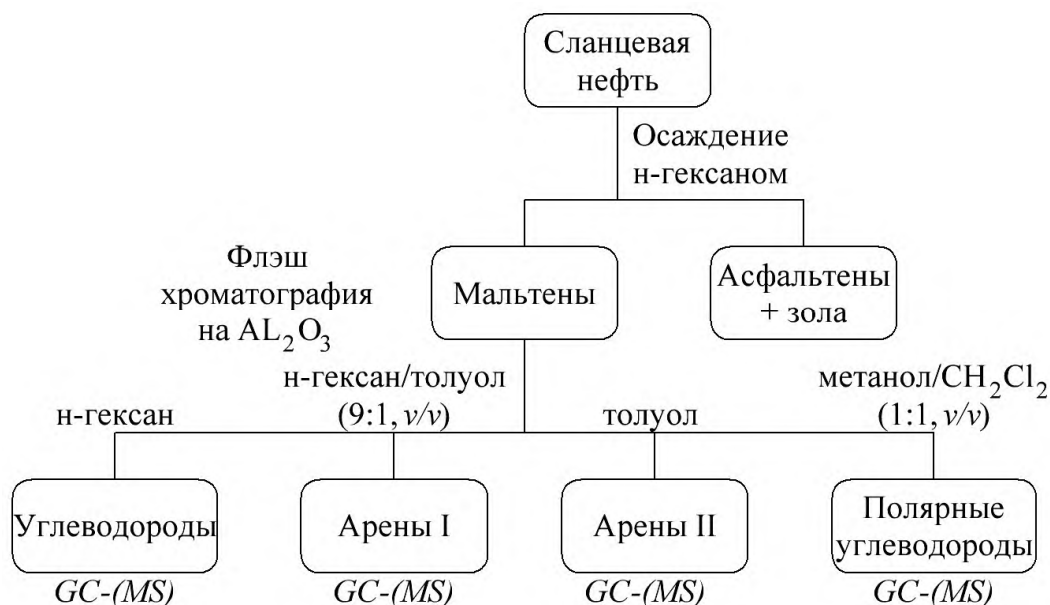


Рисунок 27 – Общая схема разделения образца сланцевой нефти.

Фракция предельных и непредельных углеводородов представлена алканами и соответствующими им алкенами от C_{10} до C_{21} . В ароматической фракции I обнаружены такие ароматические соединения, как нафталин, инден и их производные. Ароматическая фракция II в основном состоит фенантронов, антраценов, высокомолекулярных полиароматических соединений (пирены, трифенилы и их производные). Полярная фракция представлена высокомолекулярными кетонами, жирными спиртами и фенолами.

Наличие углеводородной фракции подтверждает, что в зоне реакции протекают реакции пиролиза. Стоит отметить почти полное отсутствие полиненасыщенных соединений. Это объясняется высокотемпературными процессами пиролиза алканов, при которых преобладают процессы с разрывом цепи алканов над процессами дегидрирования алканов. Ароматическая фракция I образуется вследствие конденсации полиненасыщенных алканов различной структуры. Полиненасыщенные алканы довольно легко вступают в реакции ароматизации. Также в I фракции обнаружены следовые количества углеводородов фракции предельных и непредельных углеводородов. Основные компоненты фракции II, образуются вследствие поликонденсации ароматических колец при высокой температуре. Помимо основных компонентов, по данным ГХ/МС, наблюдается присутствие небольшого количества соединений ароматической фракции I. Спирты, кетоны и эфиры, обнаруженные в полярной фракции – являются продуктами метаболизма микроорганизмов и образуются в органической компоненте ГС при диагенезе. Данные соединения могут выступать в качестве источника кислорода в процессах термической переработки сланцев. Также имеются следовые количества всех предыдущих ароматических фракций.

По данным ГХ/МС в каждой фракции обнаружены примеси от других фракций и получение фракций в чистом виде весьма затруднительно, в связи с чем, используемый метод не позволяет проводить количественный анализ и количественное разделение мальтеновой части образца сланцевой нефти. Также при разделении используется растворитель (толуол) с высокой температурой кипения ($\sim 110^{\circ}\text{C}$), что не позволяет отогнать его из фракций без потери легколетучих компонентов. Однако этот метод разделения подходит для качественного анализа с использованием ГХ/МС.

Отличительной особенностью состава сланцевой смолы полученной электрофизическим способом с быстрым нагревом от классического ретортинга можно выделить полное отсутствие алифатических циклических соединений. Это связано с более высокой температурой реакционной зоны при электрофизической конверсии и повышенным давлением в пласте, имитируемым в лабораторных условиях азотом в герметичной камере. Ароматические соединения более термоустойчивы, чем алифатические циклические, которые при высоких температурах и избыточном давлении подвергаются ароматизации. Этот факт отражает более глубокую конверсию углеводородных соединений, что приводит к большей генерации водорода. Обогащенный водородом синтез газ имеет большой потенциал применения, например, в процессах Фишера-Тропша, обладает повышенной калорийностью и может служить источником водорода для твердых водородных топливных ячеек.

Существенная часть продуктов электрофизической конверсии ГС находят свое применение в химической промышленности. Основываясь на результатах анализа ГХ/МС, можно сделать вывод, что сланцевая нефть, полученная электрофизическим нагревом образца горючего сланца, является перспективным сырьем для производства различных видов топлива и химических веществ.

Низкоскоростная конверсия

В эксперименте по низкоскоростной конверсии использовался фрагмент породы 250x160x100 мм. Залитый в бетонную рубашку с предустановленными термопарами и электродами образец помещался в герметичную экспериментальную камеру. Камера вакуумировалась и заполнялась азотом до 3 атм. Далее к образцу прикладывалось напряжение. Скорость нагрева составляла $1 \div 1,5$ °С, максимальная температура 1000 °С. Фотография образца, извлечённого из бетонной рубашки, после эксперимента представлена на рисунке 28.

На фотографиях (рис. 28) отчётливо видны границы реакционной области. Сверху она имеет форму эллипса, что объясняется увеличением плотности тока в непосредственной близости к электродам и её снижением в середине межэлектродного промежутка. Поперечное сечение также эллипсоидной формы, но уже в связи с различной теплопроводностью породы вдоль слоёв и поперёк них, в последнем случае она меньше.

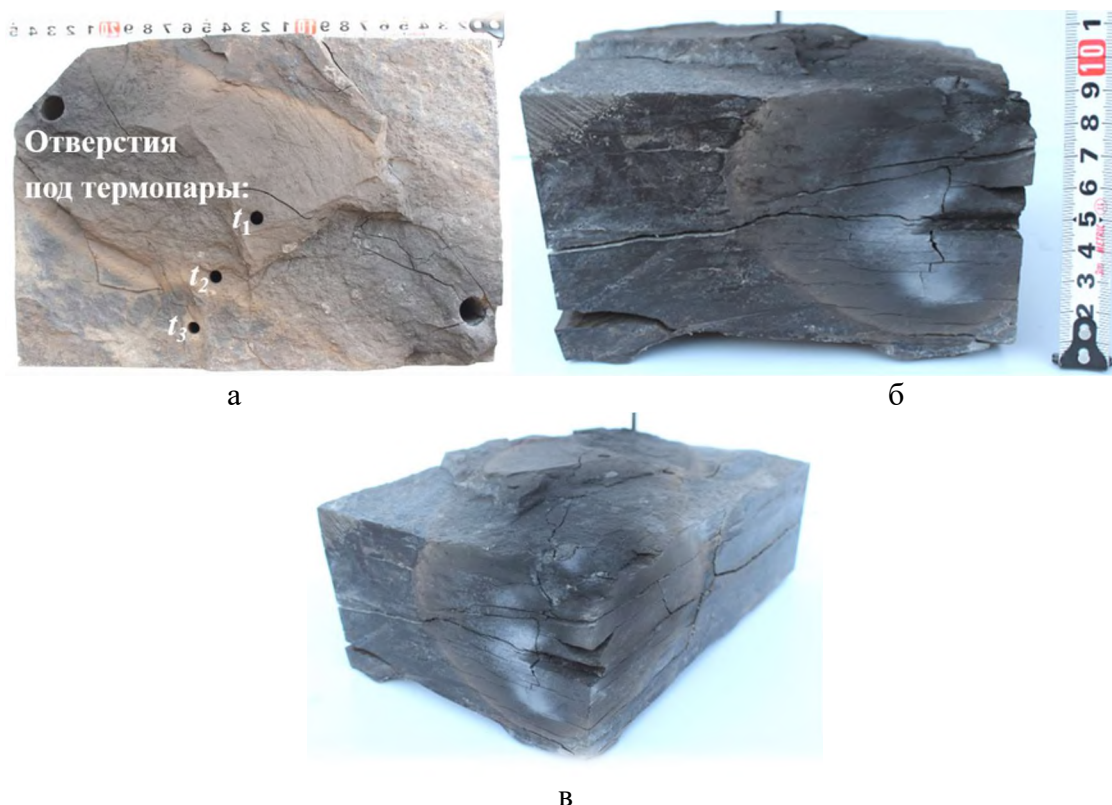


Рисунок 28 – Образец Хуадянских ГС после нагрева и извлечения из бетонной рубашки: а – вид сверху с указанием отверстий под термопары, б – вид с торца, в – вид реакционной области.

Скорость нарастания температуры поддерживалась регулировкой мощности, путём изменения прикладываемого напряжения. Динамика изменения тока, напряжения, мощности и температуры представлены на рисунке 29.

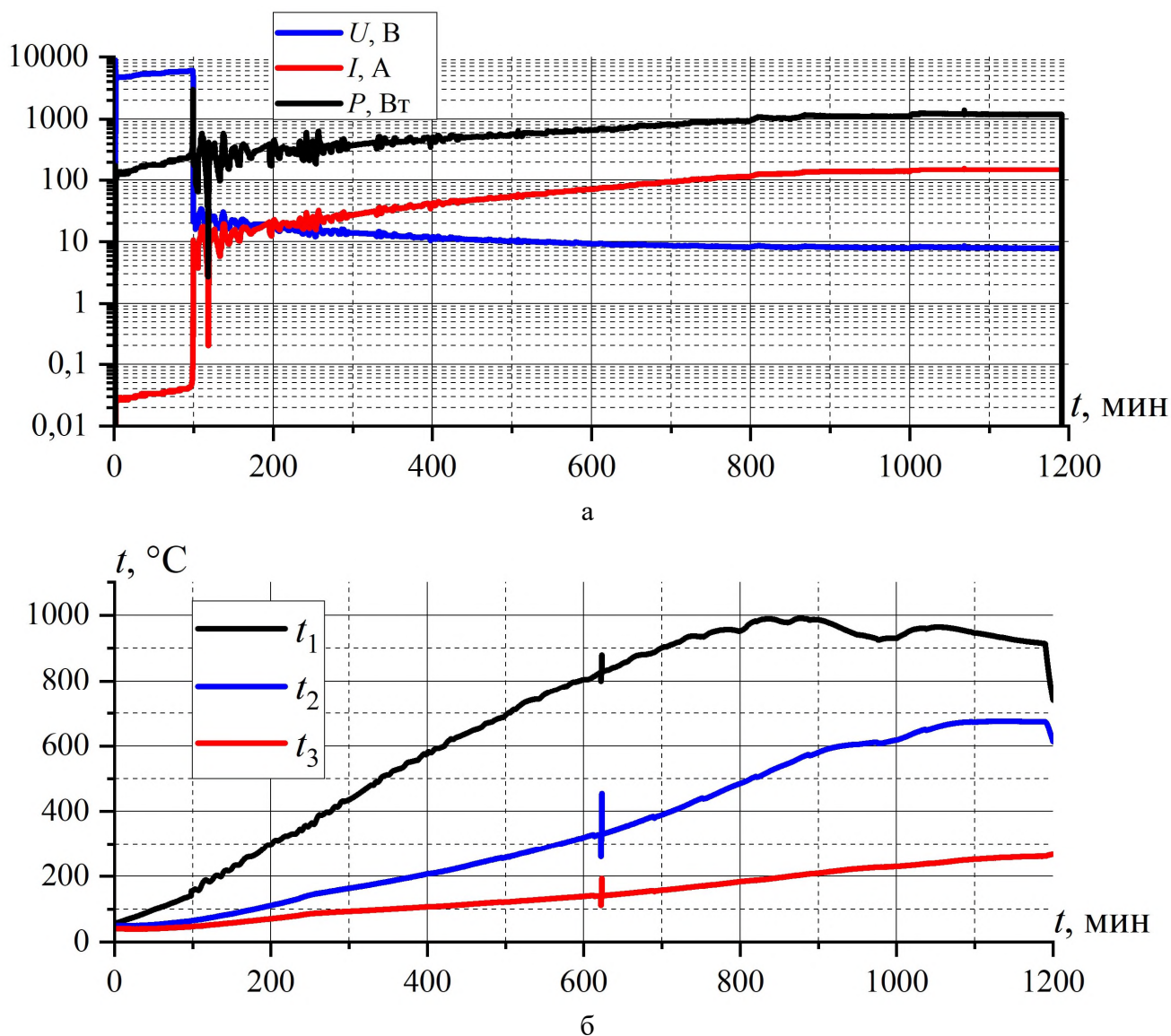


Рисунок 29 – Динамика тока, напряжения, мощности (а) и температуры (б) в процессе конверсии.

Первые 100 минут длилась вторая стадия процесса конверсии – формирование устойчивого канала после непосредственного пробоя образца. Т.е. в этот промежуток времени проводящий канал имел весьма малое сечение и высокое сопротивление. На этом временном отрезке напряжение существенно выше, а ток ниже, чем после момента окончательного формирования устойчивого, низкоомного канала. Короткий временной интервал, соответствующий этому моменту, сопровождается пиком мощности, что связано с инерционностью регулировки. Однако, общий тренд изменения мощности (рис. 29) остаётся практически линейным, как и температура на межэлектродной прямой (t_1 , рис. 29). Температура

t_2 (рис. 29) отображает динамику нагрева в переходной области между основным реакционным объёмом и исходной породой. На кривой t_3 (рис. 29) наблюдается нагрев, однако на фотографии (рис. 28) видно, что реакционная область так и не достигла этой точки. Дальнейший нагрев привёл бы к расширению реакционной области и захвату t_2 и t_3 непосредственно в процесс конверсии. При заданных межэлектродном расстоянии и аппаратно-техническом обеспечении конвертированный объём составляет практический максимум. В связи с постоянным снижением сопротивления породы из-за карбонизации дальнейший нагрев невозможен, т.к. сопротивление образца становится существенно ниже сопротивления источника напряжения и подводящих линий, включающих проходные изоляторы. Для разрешения этого нюанса через межэлектродное расстояние необходимо увеличить размеры образца, в первую очередь в длину. Однако, представленный фрагмент породы с учётом бетонной рубашки имеет максимально допустимый объём, вмещающийся в экспериментальную камеру.

В результате конверсии были получены жидкие и газообразные продукты. Газообразные продукты анализировались хроматографом, описанным в методической главе. Состав полученного газа: H_2 – 54%, CO – 19%, CH_4 – 19%, C_2H_6 – 3%, C_3H_8 – 1%, CO_2 – 4%.

Жидкие продукты обладали низкой вязкостью, поэтому подверглись стандартной разгонке Энглера. Выделены следующие фракции (% объёма):

бензиновая (до 180°C)	19%
керосиновая (140-220°C)	28%
дизельная (180-350°C)	37%
мазут ($\geq 350^\circ C$)	73%

Совокупный объём превышает 100 %, т.к. температурные диапазоны при таком анализе пересекаются. Основная задача разгонки Энглера – определение объёмного содержания конкретной фракции некоторые компоненты которой могут быть отнесены так же и во фракцию с пограничным температурным диапазоном. При этом совокупно топливных фракций получено 27 %, т.е. жидкие продукты, полученные медленной электрофизической конверсией Хуадяньских ГС, аналогичны природной нефти с минимальным порогом рентабельности.

Газовая фаза представляет собой синтез газ, обогащённый водородом с существенной примесью углеводородов. Наличие высокого содержания углеводородных соединений в газовой фазе обусловлено медленным нагревом. При разложении керогена лёгкие молекулы успевают покинуть реакционную зону, не подвергаясь повторной конверсии.

Сравнение высоко- и низкоскоростной конверсии

Продукты, получаемые электрофизической конверсией ИТТ, применимы в химической и топливной промышленности. Скоростью и максимальной температурой нагрева можно регулировать количественный и качественный состав получаемых продуктов в некотором диапазоне. При этом возможно изменять как соотношение компонент в газовой и жидкой фазах, так и соотношение этих фаз.

В результате быстрого нагрева получаемые продукты в основном представлены наиболее термостабильными соединениями. Водород и монооксид углерода – конечные продукты термодеструкции углеводородных молекул в условиях низкой концентрации кислорода. Основу жидкой фазы составляют циклические соединения, в основном с высокой молекулярной массой, что определяет весьма высокую вязкость. С точки зрения технологического применения конечных продуктов медленный нагрев более целесообразен. Вследствие снижения влияния вторичных реакций молекулы органического вещества ИТТ в гораздо меньшей степени достигают полного разложения до водорода и монооксида углерода. В связи с этим увеличивается выход именно углеводородных соединений. Газовая фаза получается более калорийной за счёт увеличения доли углеводородов и снижения монооксида углерода. При этом сохраняется высокое (от 50 %) содержание водорода. Жидкие продукты, полученные при медленном нагреве, имеют существенно меньшую вязкость по сравнению с быстрым нагревом. В связи с чем эти продукты пригодны для переработки применяющимися в нефтеперерабатывающей промышленности технологиями.

Стоит также уточнить, что скорость нагрева при электрофизической конверсии в существенной степени определяет максимальную температуру непосредственно в реакционной зоне. По мере расширения проводящего канала область термохимических превращений расширяется вместе с ним. Внутри полученной структуры остаётся зольный остаток, насыщенный углеродом, снаружи – исходная порода. Максимальная температура постоянно растёт, а термически преобразованная область расширяется. В связи с ограниченной теплопроводностью породы высокая скорость нагрева приводит к повышению температуры непосредственно в реакционной зоне.

Выводы по главе

ИТТ можно охарактеризовать как весьма гетерогенный, анизотропный материал нерегулярного строения. Основные компоненты – органическая и минеральная. Присутствуют поры и трещины от нано до микроразмеров. Органическая компонента представляет собой нерегулярный высокомолекулярный полимер. Минеральная часть представлена диэлектриками, полупроводниками и слабопроводящими материалами.

Электрическое поле в ИТТ приобретает резкую неоднородность вследствие синергии ряда эффектов, обусловленных структурой породы и электрофизическими свойствами её компонент. В связи с этим напряжение и напряженность возникновения ЧР в ИТТ имеют весьма низкие значения. Высокая, относительно диэлектриков, проводимость породы в совокупности с относительно низкой теплопроводностью приводит к её существенному нагреву. Совокупность этих обстоятельств влечёт формирование проводящего канала при низких уровнях напряжения. Стоит учитывать, что высокая проводимость не должна позволять накапливаться заряду и нейтрализовать воздействие ЧР. Однако, это же обстоятельство ведёт к меньшему ограничению тока, а, следовательно, и энергии ЧР. При этом проводимость в ИТТ в основном примесная, т.е. подвижность носителей заряда снижена, значит с учётом времени частичного разряда (нано- и микросекунды) накопить заряд всё же возможно. Канал пробоя в основном ориентирован вдоль слоёв с возможными переходами между смежными слоями. В связи с термическими напряжениями образец расслаивается, обнажая канал пробоя. Видимые визуально дендриты также присутствуют на этих поверхностях. Такая ориентация вызвана преобладанием поверхностной проводимости над объёмной.

Сформированный в породе проводящий канал может использоваться в качестве нагревательного элемента для термической конверсии органической компоненты породы в газообразные и жидкие продукты. Управляя вводимой мощностью с учётом динамически изменяющегося сопротивления, можно добиться управляемых температурных градиентов в породе. Продукты электрофизической конверсии пригодны для утилизации в топливно-химической промышленности. При этом медленный нагрев позволяет получить более пригодные для переработки продукты. Газовая фаза в этом случае более калорийна, т.к. содержит более 20 % углеводородов, что в два раза превышает это значение для быстрого нагрева. Жидкая фаза при медленном нагреве имеет невысокую вязкость и близка по фракционному составу к природной нефти, в то время как при быстром нагреве представляет собой битумоподобную массу.

Одной из ключевых проблем в лабораторных условиях является сильное снижение сопротивления в процессе конверсии. При достижении значений сопротивления, сопоставимых с внутренним сопротивлением источника продолжение процесса невозможно. До некоторого предела это обстоятельство можно устранить технически: использование кабелей и проходных изоляторов в вакуумной камере с большим сечением проводника, установка понижающих трансформаторов для снижения внутреннего сопротивления источника. Подобные мероприятия позволяют изучать более глубокую степень конверсии в лабораторных условиях, но принципиально не решают проблему работы источника на короткое замыкание в рамках способа для подземных пластов.

Глава 4. Полевые испытания электрофизической конверсии ископаемых твёрдых топлив, на примере каменного угля разрез «Богатырь» (Казахстан)

4.1. Испытательный полигон на разрезе «Богатырь» (Казахстан)

Испытания электрофизической конверсии в полевых условиях проводились на разрезе «Богатырь» (г. Экибастуз, Казахстан). Это месторождение каменного угля марки КСН (коксовый слабоспекающийся низкометаморфизованный) с высокой зольностью (~40%). Запасы угля разреза «Богатырь» ~ 2,5 млрд. тонн. Основные производственные показатели разреза представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Основные производственные показатели разреза «Богатырь» за 2014-2025 годы.

Показатели	Ед.изм.	Годы					
		Факт					
		2014	2015	2016	2017	2018	2019
Добыча угля , всего	тыс.т.	38 003	34 482	35 051	40 408	44 865	44 848
Реализация угля, всего	тыс.т.	38 138	33 923	35 082	40 858	45 158	44 685
Вскрыша, всего	тыс.м ³	25 150	24 153	24 400	29 993	29 768	29 379
Показатели	Ед.изм.	Годы					
		Факт					План
		2020	2021	2022	2023	2024	2025
Добыча угля , всего	тыс.т.	43 338	44 632	42 473	42 927	42 675	45 000
Реализация угля, всего	тыс.т.	43 436	44 741	42 409	42 491	42 997	45 000
Вскрыша, всего	тыс.м ³	36 534	32 403	33 404	35 927	40 177	48 975

Испытательный полигон располагался в самой нижней точке карьера, на открытом первом пласте, горизонт – 280 м. Участок пласта размерами 40х20 м, выделенный под испытания, не имел перепадов высоты. В рамках полигона непосредственно для испытаний было оборудовано два участка 4х5 м, схема расположения элементов представлена на рисунке 30.

К испытательному полигону предъявлялись повышенные требования по электробезопасности, т.к. ВН прикладывалось непосредственно к фрагменту пласта. Для исключения возможности попадания людей в зону возможного возникновения шагового напряжения устанавливались ограждения. Экспериментальная установка питалась от

комплектной трансформаторной подстанции КТП – 400/6/0,4, которая в свою очередь питалась от локальной переносной ЛЭП 6 кВ.

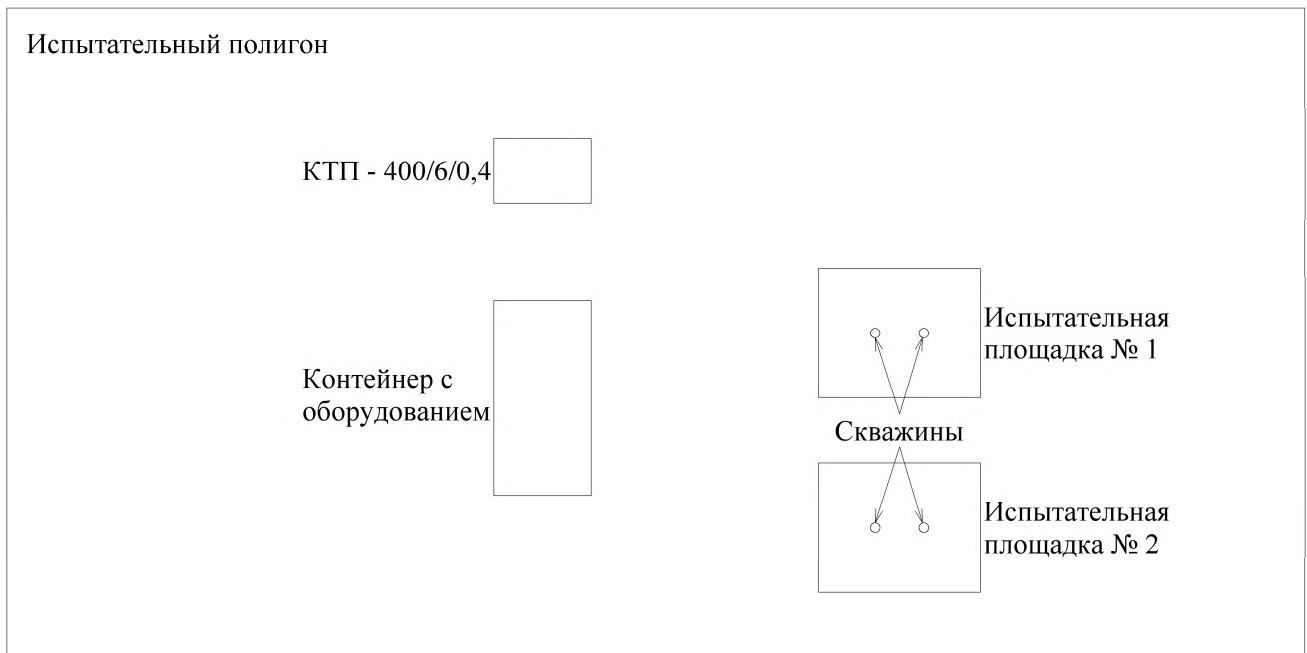
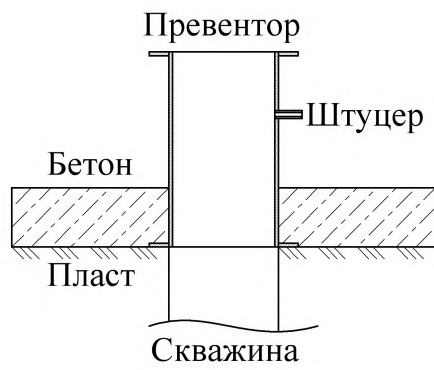


Рисунок 30 – Схема расположения элементов полигона.

В центре экспериментального участка 4x5 м были пробурены две скважины глубиной 1.5 м, диаметром 300 мм, расстояние между скважинами 1,5 м. После установки превенторов на скважины, заливался бетоном марки М200, высота заливки 150 мм. Для уменьшения проводимости в целях повышенной безопасности и снижения вероятности токовых утечек бетон армировался стеклополимерной (т.е. диэлектрической) арматурой. Заливка имитирует кровельные породы, и существенно снижает непосредственный выход продуктов конверсии из межэлектродного промежутка на поверхность. Превенторы представляют собой фрагмент трубы с фланцами по торцам с вваренным в стенке штуцером для отбора продуктов. Верхний фланец служит для герметичной установки проходного изолятора. Нижний фланец для большей устойчивости при заливке испытательного участка бетоном. Схематичное изображение и общий вид установленного превентора показан на рисунке 31.

Для защиты оборудования от осадков и угольной пыли все агрегаты располагались в контейнере. Напряжение от установки к нагрузке подводилось через проходные изоляторы, установленные в стенке контейнера. Контейнер был удалён на расстояние ~ 10 м от непосредственно нагреваемого фрагмента пласта. Пульт управления выносился на 20 м от силовой части. Общий вид испытательного полигона представлен на рисунке 32.



а



б



в

Рисунок 31 – Схематичное изображение (а) и общий вид установленного (б) и не установленного превентора (в).



Рисунок 32 – Общий вид испытательного полигона.

4.2. Опытная полевая установка для испытания электрофизической конверсии ископаемых твёрдых топлив

Принцип устройства опытной полевой установки в части силового оборудования и управления аналогичен лабораторному комплексу (гл. 2 п. 2). В основе лежит несколько источников напряжения с различной нагрузочной способностью. Такой подход обусловлен тремя основными стадиями электрофизической конверсии. На начальном этапе сопротивление породы может быть высоко и для формирования проводящего канала может возникнуть необходимость в приложении напряжения в несколько десятков киловольт. При этом ток первой ступени может быть невысоким, т.к. ключевым параметром является мощность. Следующая стадия снижения сопротивления сформированного канала требует напряжения до десятка киловольт и тока в несколько ампер. Т.к. ключевой параметр мощность, то при снижении напряжения второго звена необходимо увеличивать ток, приблизительно до десятка ампер. Токовая ступень подключается при достижении сопротивления канала, которое позволяет выделять не меньше нескольких киловатт мощности при напряжении до 400 В. Структурная схема установки приведена на рисунке 33.

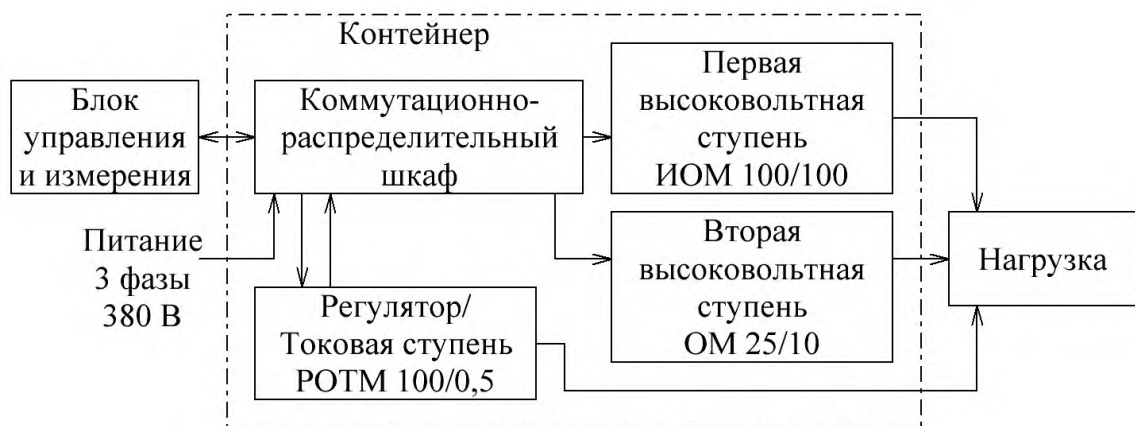


Рисунок 33 – Структурная схема опытной полевой установки.

Питание установки подавалось от комплектной трансформаторной подстанции КТП – 400/6/0,4. Функцию основных силовых коммутирующих устройств в коммутационно-распределительном шкафу выполняли контакторы КТИ-7630 630А 230В/АС3. Регулировка напряжения осуществлялась трансформатором РОТМ 100/0,5. Этот регулятор обладает низким КПД в связи с принципом действия. Напряжение изменяется вследствие перемещения короткозамкнутого витка вдоль магнитопровода и изменении магнитной связи этого витка с обмоткой. Как следствие РОТМ имеет большой ток холостого хода и низкий КПД. Однако высокая нагрузочная способность и плавная, глубокая регулировка во всём диапазоне напряжения делает этот регулятор весьма функциональным устройством для исследовательских,

лабораторных и опытных работ. РОТМ 100/0,5 позволяет поддерживать ток в нагрузке до 264 А при линейном напряжении 380 В. Первой высоковольтной ступенью был ИОМ 100/100, предназначенный для начальной стадии формирования проводящего канала в пласте. ИОМ – испытательный трансформатор поэтому на полную мощность может работать кратковременно (30 мин), длительно же на 60 %. Однако при напряжении несколько десятков киловольт и токе 0,5 А, обеспечиваемая им мощность превышает 10 кВт, что достаточно для стадии формирования первичного канала проводимости. В качестве второй высоковольтной ступени использовался ОМ 25/10 в обратном включении. Такое решение негативно, но не существенно сказывается на КПД всей установки. При этом позволяет упростить техническую реализацию за счёт использования серийно выпускаемого продукта. Номинальная мощность этого трансформатора 25 кВт, напряжение 10 кВ. ОМ выдерживает длительную двукратную перегрузку по току при соблюдении температурного режима эксплуатации. Эта особенность делает применение этого источника напряжения выгодным в диапазоне напряжений $\sim 400 \div 2000$ В, когда для обеспечения мощности необходим повышенный ток.

Подвод напряжения к нагрузке осуществлялся через 2 комплекта проходных изоляторов. Один установлен в корпусе контейнера с электрооборудованием. Второй монтировался на превенторы и обеспечивал их герметизацию и подвод напряжения непосредственно к фрагменту угольного пласта. В качестве электродов использовались фрагменты стальной трубы диаметром 80 мм и длиной 150 мм. Переключение источников напряжения производилось вручную внутри контейнера при отключенном питании. Проходные изоляторы в контейнере представляют собой полипропиленовую трубу длиной 2500 мм, диаметром 110 мм, с толщиной стенки 18,3 мм. По торцам трубы установлены колпаки, центрирующие токовод. Внутри установлены латунные стержни диаметром 25 мм, т.е. площадь сечения 490 мм^2 . Такая площадь сечения выбрана с учётом предельных удельных токов для медного проводника и большего сопротивления латуни относительно медного до 6 раз. Изоляторы, установленные на превенторы изготовлены из полиэтилена, представляют собой фланец и основное тело с оребрением. Общий вид этих изоляторов представлен на рисунке 34. Длина пути утечки составляет 1100 мм.

Для эмпирически заданной мощности 3 кВт в диапазоне напряжений от 100 кВ до 10 В, по известной формуле $P = U \cdot I$ нагрузочный диапазон установки будет иметь вид, показанный на рисунке 35 пунктирной линией. С учётом параметров силовых агрегатов установки реальный нагрузочный диапазон имеет вид, показанный на рисунке 35 сплошной линией. Максимальные параметры: напряжение – 100 кВ, ток – 264 А.

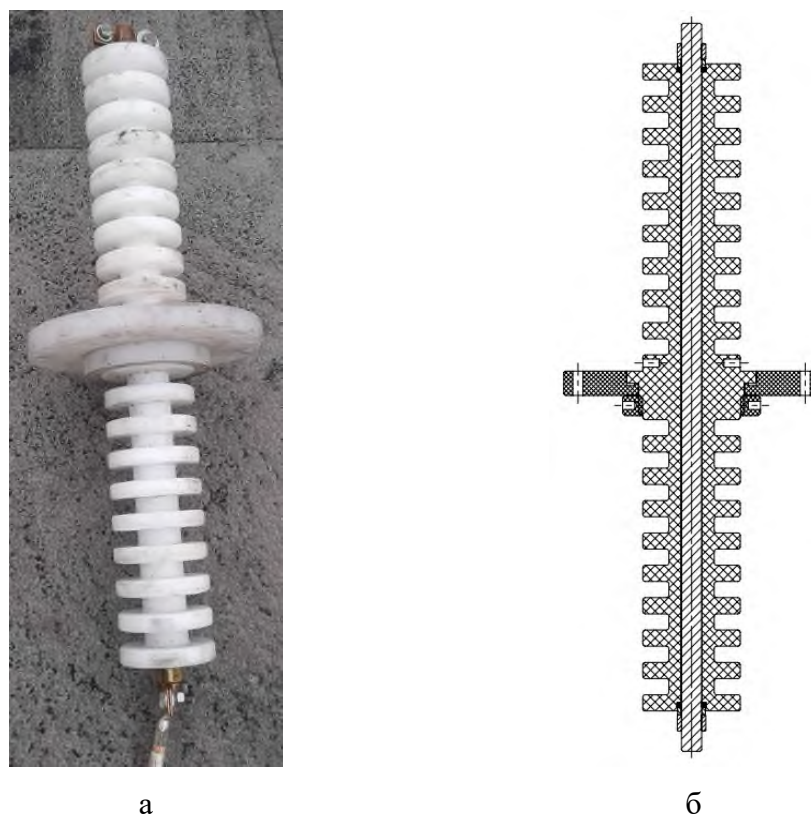


Рисунок 34 – Общий вид (а) и сечение (б) проходного изолятора, устанавливаемого на превенторы.

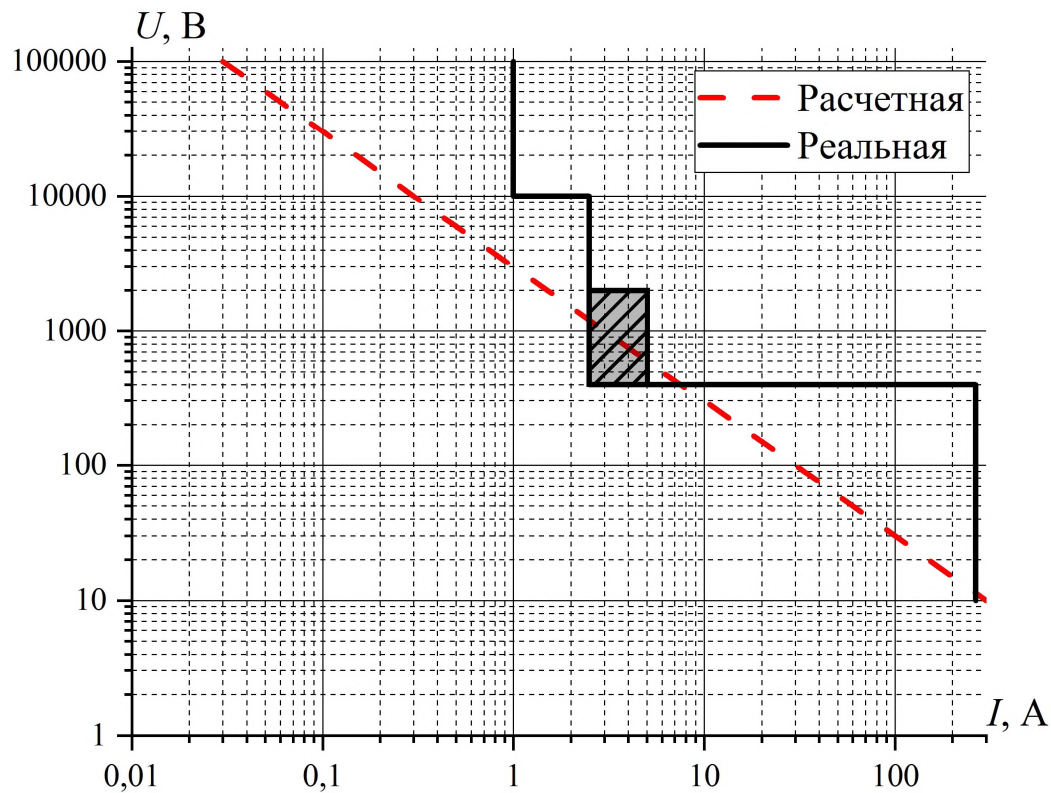


Рисунок 35 – Нагрузочная характеристика: пунктир – непрерывный диапазон 3 кВт, сплошная – реальная характеристика опытной полевой установки, заштрихованная область – диапазон двукратной перегрузки ОМ 25/10 по току.

Рисунок 35 демонстрирует, что диапазон нагрузочной способности обеспечиваемой опытной установкой с учётом допустимой перегрузки ОМ 25/10 составляет 3 кВт. Исключен небольшой участок перехода от стадии формирования стабильного низкоомного канала к стадии непосредственного продуктивного нагрева. Это обстоятельство влечёт увеличение времени, затрачиваемого на этот переход.

4.3. Полевые испытания электрофизической конверсии каменного угля разрез «Богатырь» (Казахстан)

В ходе полевых испытаний опытная установка подключалась к подготовленному фрагменту пласта. После приложения напряжения к породе осуществлены все три стадии электрофизической конверсии ИТТ: начального формирования проводящего канала, переходная стадия увеличения проводимости сформированного канала, непосредственно продуктивный нагрев пласта. Динамика основных электрофизических параметров в процессе полевых испытаний приведена на рисунке 36. В результате пусконаладочных работ было установлено, что сопротивление экспериментального фрагмента породы составляет 400 Ом. Поэтому первый этап конверсии требует относительно высокого тока и реализован посредством ОМ 25/10, т.е. второго высоковольтного звена, использование первого высоковольтного звена (ИОМ 100/100) не потребовалось. На рисунке 36 явно наблюдаются три характерных временных интервала, соответствующие стадиям электрофизической конверсии.

В первые 3,5 часа от запуска процесса наблюдаются стохастические колебания сопротивления фрагмента угольного пласта около значения 400 Ом. В связи с крайне высокой гетерогенностью угольного вещества, проводимость распределена в объёме весьма неоднородно. Помимо этого, в пласте присутствует некоторое количество влаги, также неоднородно распределённой на микроуровне. Ток, протекающий через породу, замыкается через наиболее низкоомные участки. В итоге, каналы протекания тока с наименьшим сопротивлением подвергаются локальному нагреву. Это обстоятельство увеличивает проводимость канала, что приводит к увеличению тока этого локального канала. Дальнейший рост температуры влечёт перегрев токового пути и, как следствие, испарение влаги и увеличение микротрещиноватости. В итоге сопротивление этого участка возрастает, а ток начинает протекать по более низкоомному каналу. В результате этого многократно повторяющегося цикла в некоторой макрообласти повышается температура накапливается определённый объём микротрещин и удаляется существенная часть влаги. Отсутствие влаги снижает динамику перераспределения токов.

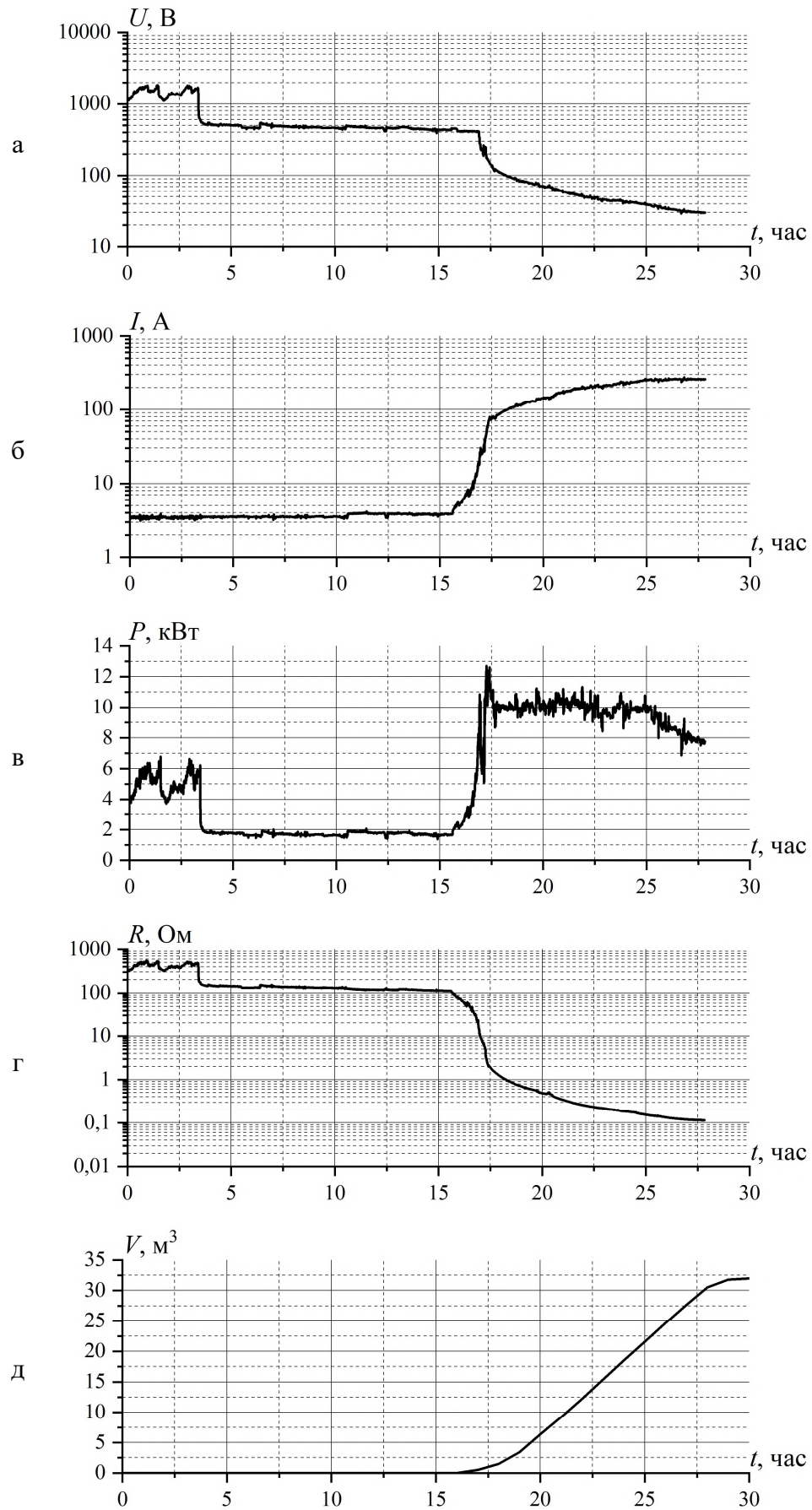


Рисунок 36 [68] – Динамика основных электрофизических параметров в процессе полевых испытаний. а – напряжение, б – ток, в – мощность, г – сопротивление, д – выход газа.

Влияние микротрещиноватости также нивелируется вследствие существенно ограниченной подвижности породы в условиях залегания и смыкания старых трещин при появлении новых. К тому же повышенная температура этой макрообласти приводит к пониженному её сопротивлению и формированию токового канала в пределах этого объёма. Таким образом, прекращается процесс сильного динамического перераспределения токов в угольном веществе и формируется стабильный проводящий канал пониженного сопротивления.

Колебания сопротивления также отражаются на прикладываемом напряжении и выделяемой в нагрузку мощности (рис. 36 а, в). Это связано с выбранным принципом регулирования максимизации выделяемой мощности. На первом этапе напряжение и мощность не достигают максимальных значений этих параметров для ОМ 25/10. При этом ток находится в значении 4 А, т.е. 60 % перегрузки. Поэтому при регулируемом напряжении, стабилизируемым параметром выбран ток. Это приводит к повторению формы колебаний сопротивления на напряжении и мощности и их отсутствию на токе.

Сформированный в первой стадии канал имеет более высокую проводимость, чем исходная порода, но всё ещё требующую высокого напряжения для выделения мощности достаточной для продуктивного нагрева. Поэтому использование токового звена (РОТМ 100/0,5) на этом этапе технически нецелесообразно. Максимальное напряжение, обеспечиваемое РОТМ 380 В. При достигнутом после первой стадии сопротивлении в ~ 150 Ом, максимальная мощность, выделяемая в пласте, составит $\sim 0,9$ кВт. С учётом ограничения по току в 5 А, используя ОМ 25/10 максимальная мощность составит 3,75 кВт. В связи с этим второй этап осуществлялся посредством второго высоковольтного звена (ОМ 25/10).

На этапе от 3,5 до 16 часов от начала испытаний происходило постепенное снижение сопротивления породы вследствие джоулевого нагрева. При достижении температуры проводящего канала $200 \div 300$ °С начинается активная карбонизация, т.е. увеличение локальной концентрации углерода. Далее увеличивается сечение карбонизированного канала и, как следствие, скорость снижения сопротивления. При достижении сопротивления канала ~ 80 Ом становится целесообразным переключение на токовое звено.

После 16 часов от начала испытаний наступила фаза продуктивного нагрева, который осуществлялся токовым звеном (РОТМ 100/0,5). Мощность, выделяемая в канале практически не изменилась, но технический максимум тока составил 250 А. Это позволило за короткий промежуток времени существенно повысить мощность. Через ~ 30 мин этот параметр достиг ~ 5 кВт и запустился процесс активного выделения газообразных продуктов конверсии. В течение последующих 30 минут мощность достигла 10 кВт и поддерживалась постоянной на протяжении

8 часов. В интервале времени 16,5÷25 дебит газа был практически постоянным и составил 3 м³/час.

Через 25 часов после начала испытаний сопротивление экспериментального фрагмента пласта снизилось до значения 0,16 Ом и продолжало снижаться. Это обстоятельство привело к снижению мощности, т.к. оборудование обеспечивает максимальный ток в 250 А. В итоге это привело к плавному уменьшению мощности до 7,5 кВт в течение дальнейших трёх часов, как следствие снизился дебит газообразных продуктов. Через 28 часов от начала эксперимента был достигнут технический максимум испытательной установки и испытания завершились. Выделение газообразных продуктов происходило ещё ~2.5 часа после отключения установки с плавно снижающимся дебитом и, в итоге, окончательного его прекращения. Общий объём газообразных продуктов конверсии составил 33 м³, состав полученного газа приведён в таблице 14.

Таблица 14 – Состав газа, полученного в процессе полевых испытаний электрофизической конверсии на разрезе «Богатырь».

Компонент	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂	N ₂	Калорийность, МДж/м ³ (ккал/м ³)
Содержание, % об.	22,29	4,49	5,12	73,20	10,11	10,91 (2608)

Для оценки КПД установки собраны данные по выделяемой мощности и затраченной электроэнергии по каждому этапу и совокупно за всё время эксперимента. Цепи питания установки были оснащены электросчётчиком. Все эти данные приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Средняя мощность, выделяемая в нагрузке поэтапно и энергопотребление испытательной установки.

Параметр \ Стадия	1 (0÷3,5)	2 (3,5÷16)	3 (16÷25)	4 (25÷28)	Всё время
Мощность нагрузки, кВт	4,98	1,86	9,96	8,46	-
Электроэнергия подведённая к нагрузке, кВт·ч	17,68	24,62	86,55	22,25	151,28
Показания электросчётчика, кВт·ч	-	-	-	-	204,2
Средний КПД, %	-	-	-	-	74

1 – стадия начального формирования проводящего канала, 2 – стадия увеличения проводимости сформированного канала, 3 – стадия продуктивного нагрева пласта, 4 – стадия снижения дебита газа.

Средний КПД испытательной установки составил 74 %. Это высокий показатель при условии экспериментального характера установки и с учётом особенностей применения силовых агрегатов, входящих в её состав. В штатном режиме работы трансформатор ОМ 25/10 понижающий, но был подключен в обратном включении, т.е. в качестве повышающего.

РОТМ 100/0,5 имеет низкий КПД в связи наличием короткозамкнутого витка для регулировки выходного напряжения. Для оценки степени достигнутой конверсии был проведён анализ физико-химических характеристик карбонизированного угля с испытательного фрагмента, приведённый в таблице 16.

Таблица 16 – Физико-химические показатели карбонизированного образца угля после электрофизической конверсии.

Показатель	Значение
Массовая доля аналитической влаги, W^a , %	1,40
Зольность, A , %	47,70
Летучесть(V^a), %	18,22
Массовая доля общей серы, S^d , %	0,31
Массовая доля фосфора, P^d , %	0,04
Массовая доля углерода, C^d , %	46,08
Массовая доля водорода, H^d , %	1,69
Теплота сгорания в расчёте на сухое состояние топлива, Q^d_s , ккал/кг	4625,39
Суммарный объём пор, см ³ /г	0,107
Насыпная плотность, г/см ³	0,80
Адсорбционная активность, %:	
-по метилоранжу	9,00
-по метилен голубому	12,50
-по иоду	10,16

Стоит обратить внимание на зольность и летучесть угля подвергшегося конверсии. Зольность составила 47,7 %, что лишь на 7,7 % выше средней величины этого параметра для исходной породы (40 %). Это говорит о том, что во фрагменте угля после конверсии осталась большая часть органической компоненты. Относительно высокая величина показателя летучести (18,22 %) так же связана с этим обстоятельством. Таким образом достигнута низкая, относительно полной, степень конверсии, что связано в первую очередь с техническим ограничением тока экспериментальной испытательной установки. Помимо этого, следует учесть выделение не только газообразных, но и жидких продуктов электрофизической конверсии. Существенное количество смолы, выходящей из реакционной зоны в аэрозольной фазе, сконденсировалось во всём тракте эвакуации продуктов конверсии: на внутренних стенках отводящих шлангов, в «отбойнике», представляющем собой полиэтиленовую бочку, на сопле сбросного крана. Эти продукты могут служить в качестве химико-технологического сырья.

4.4. Оценочные испытания на масштабируемость и рекомендации по модернизации опытной полевой установки

После испытаний электрофизической конверсии подготовленного фрагмента угольного пласта с межэлектродным расстоянием 1,5 м в рамках испытательной площадки осуществлён пробный пуск установки с увеличенным расстоянием между скважинами. Целью этого эксперимента была качественная оценка влияния межэлектродного расстояния на начальное сопротивление продуктивного фрагмента угля и, как следствие, требования к электрическим параметрам необходимого оборудования. Напряжение прикладывалось к скважинам двух испытательных площадок, т.е. между площадками, расстояние между электродами составило 5,8 м. В качестве выходного источника напряжения использовался ОМ 25/10, т.е. второе высоковольтное звено. Динамика электрических параметров наблюдалась в течение трёх часов. Начальная выделяемая в нагрузку мощность составила ~4,2 кВт и была технически ограничена током в 4 А. Собранные данные по динамике электрических параметров в процессе этого эксперимента продемонстрированы на рисунке 37.

Исходное сопротивление фрагмента угольного пласта в этом эксперименте составило 300 Ом. Спустя 3 часа, при остановке пробного пуска оно снизилось до 200 Ом. Снижение сопротивления связано с нагревом межэлектродного расстояния подробно описанным в предыдущем параграфе. При испытании полного цикла (п. 4.3) начальное сопротивление составило ~400 Ом. Несмотря на увеличение межэлектродного расстояния почти в 4 раза, с 1,5 м до 5,8 м, сопротивление не возросло, и, более того, снизилось. Это обстоятельство говорит о преобладании снижения сопротивления из-за растекания тока по пласту над его увеличением с увеличением межэлектродного расстояния. При межэлектродном расстоянии 5,8 м объём прогреваемого образца существенно больше, чем при 1,5 м. Помимо этого увеличивается и растекание тока, т.е. снижается его плотность, а, следовательно, удельная мощность, выделяемая в нагрузку. Таким образом, существенно снижается скорость прогрева фрагмента угольного пласта. Поэтому используя испытательную установку с имеющимся техническим ограничением по току, осуществить полный цикл конверсии при расстоянии между скважинами 5,8 м не представляется возможным в разумных, с точки зрения технической возможности нахождения на разрезе, временных интервалах. В то же время напряжение, требуемое для начальной стадии электрофизической конверсии, не возросло и составило ~10 % от технического максимума для второго высоковольтного звена. Следовательно, уровень напряжения, обеспечиваемый испытательной установкой сильно избыточен даже для больших (~10÷20 м) межэлектродных расстояний.

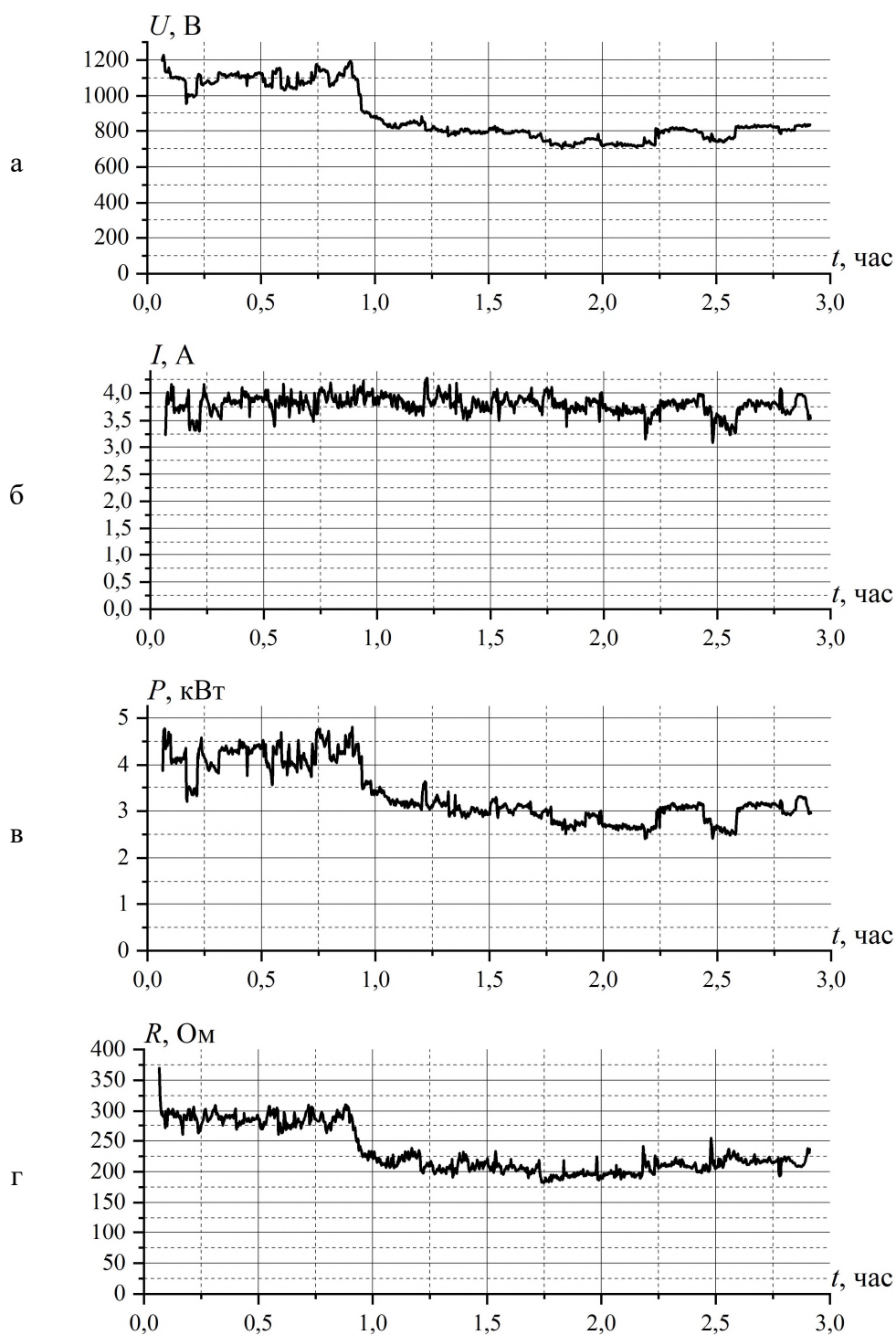


Рисунок 37 – Динамика электрических параметров процесса конверсии при подключении напряжения между участками (межэлектродное расстояние 5,8 м). а – напряжение, б – ток, в – мощность, г – сопротивление.

На основании проведённых экспериментов можно сделать вывод о возможности масштабирования электрофизической конверсии ИТТ на технологически целесообразные (от 10 м) расстояния между скважинами. Опираясь на параметры полевой испытательной установки необходимо снизить максимальное напряжение с сохранением мощности, что приведёт к увеличению максимального тока и более эффективному и оптимальному её использованию. В

особенности это касается второго (промежуточного) высоковольтного звена, функцию которого выполнял ОМ 25/10. Для усиления эффекта оптимизации целесообразно будет разделить промежуточный диапазон нагрузочной способности (рис. 35) на два поддиапазона. Тогда при использовании трансформаторов ТСЛ-100-35/0,4 и ТСЛ-100-6/0,4 можно будет обеспечить большую, чем в проведённых экспериментах, мощность, выделяемую в нагрузку для более широкого диапазона сопротивлений. Это особенно важно для сопротивлений низкой величины от ~ 70 до 500 Ом. Стоит отметить, что указанные трансформаторы должны использоваться в обратном включении, т.е. использоваться в качестве повышающих. Кроме этого они трехфазные и для оптимизации использования их потенциала на однофазную нагрузку необходимо нештатное подключение обмоток НН и ВН. При необходимости достижения более глубокой конверсии потребуется использование понижающего трансформатора с высоким выходным током, например, печной трансформатор ОСЭ 100-380/25. На рисунке 38 приведён диапазон обеспечиваемых мощностей с учётом описанной модернизации. В приведённом случае для трансформатора ТСЛ используется последовательное включение двух крайних обмоток НН и параллельное для ВН. ОСЭ 100-380/25 в штатном режиме имеет две выходных обмотки (НН) включаемые последовательно или параллельно. Эскизы схем, разработанных в рамках модернизации установки, представлены в приложении В.

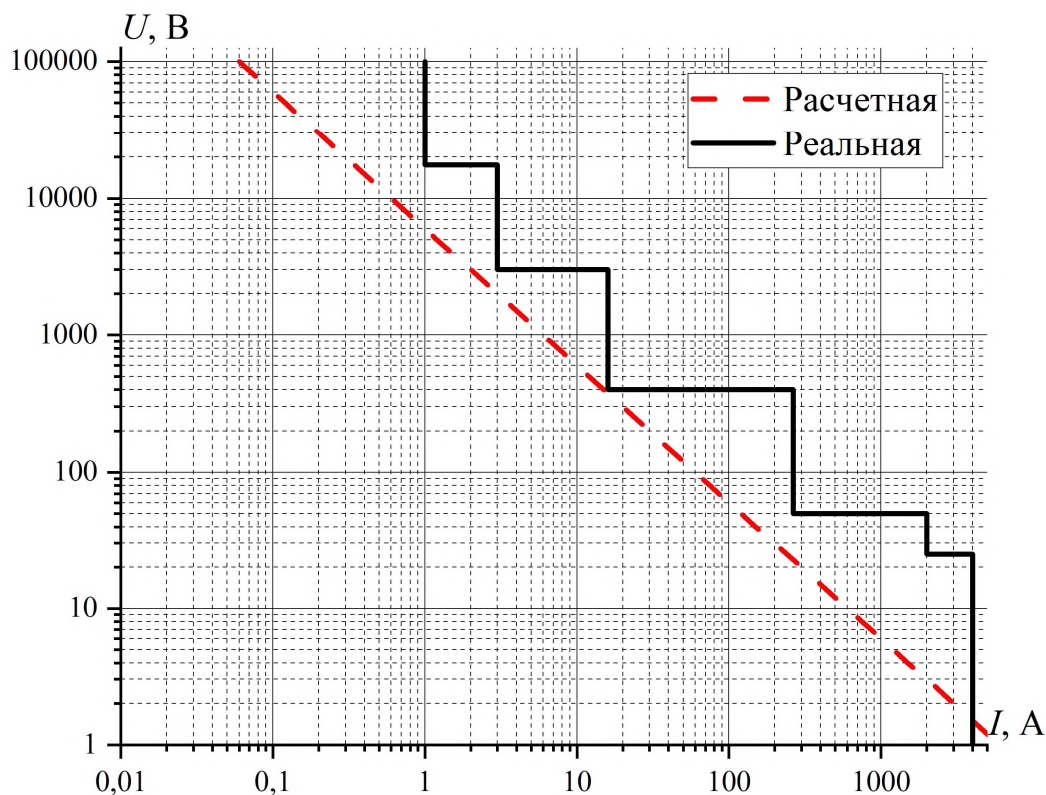


Рисунок 38 – Диапазон мощностей обеспечиваемых опытной установкой с учётом модернизации. Прямая линия 6 кВт.

4.5. Оценка полученных результатов и перспективы их использования

Испытания электрофизической конверсии в условиях непосредственного залегания пласта показали положительный результат. КПД установки, не смотря на её опытный характер, имеет высокое значение (74 %). Этот показатель можно увеличить, оптимизировав конфигурацию оборудования. Современные силовые трансформаторы имеют КПД 90 % и более, т.е. теоретический максимум КПД установки лежит в этих пределах. Работа осуществлялась с целью уточнения технических и технологических ограничений применения исследуемого способа в натуральных условиях. Влияние температурных режимов нагрева в полевых условиях не исследовались. При этом теплотворная способность получаемого газа составила ~ 10 МДж/м³. Этот параметр ниже чем у природного газа, но выше в 2,5 раза чем у газообразных продуктов ПГУ (~ 4 МДж/м³). Можно сделать предварительный вывод о большом потенциале электрофизической конверсии.

Стоит учитывать существенное влияние на состав продуктов и, как одно из следствий, теплотворную способность типа ИТТ и условий залегания. Состав получаемых продуктов зависит не только от режимов нагрева, но и от состава ИТТ. То есть режим подбирается исходя из начального сырья и требуемых конечных продуктов, очевидно при возможности их получения из этого сырья. С точки зрения процесса конверсии условия залегания влияют главным образом обводнённостью и глубиной пласта. Вода вносит в процесс водород, что сказывается скорее положительно, и кислород, влияние которого неоднозначно. Водород сам по себе может быть целевым газом, а также способствует выделению углеводородов. Кислород, с одной стороны, окисляет продукты и сырьё, что в целом снижает теплотворную способность продуктов и вероятность образования углеводородов, с другой, реакции окисления экзотермические и осуществляют дополнительный приток энергии, причём непосредственно в реакционной зоне. При увеличении глубины залегания увеличивается и давление флюидов в пласте, что в свою очередь, непосредственно влияет на течение химических реакций.

Влияние обводнённости на процесс формирования проводящего канала не однозначно. Присутствие воды существенно снижает сопротивление породы, что увеличивает вероятность теплового пробоя, каков вклад частичных разрядов при таких условиях до конца не ясно. При этом высокое содержание воды в пласте может привести к слишком большому растеканию тока по объёму. Это обстоятельство приведёт к увеличению требуемой мощности высоковольтного источника и может затруднить локализацию тока и формирование канала вплоть до невозможности последнего при разумных, с прикладной точки зрения, параметрах оборудования и временных экспозициях. Однако это может не сыграть существенную роль, т.к. в весьма

гетерогенном материале ИТТ с развитыми межслоевыми и кливажными трещинами, динамически изменяющимися, при протекании тока, параметрами и присутствием воды высока вероятность возникновения незавершенных разрядов по поверхности. Эти разряды будут приводить к карбонизации породы и формированию проводящего канала.

Используя полученные в испытаниях данные можно провести весьма приблизительную и опосредованную оценку эффективности электрофизической конверсии. Затраченная электроэнергия за весь период испытаний составила 204,2 кВт·ч или 735120 кДж. Объем полученного газа составил 33 м³, его теплотворная способность 10910 кДж/м³, что эквивалентно 360030 кДж. Соотношение полученной энергии по газу к затраченной составляет 0,49 с учётом КПД установки. Испытания велись на открытом участке пласта в непосредственной близости к поверхности, т.е. без кровельных пород, что приводит к повышенным утечкам газообразных продуктов. Система трещин, создающая пути утечек, имеет некоторое газодинамическое сопротивление, т.е. по мере удаления от реакционной зоны поток в этой системе снижается. С этой точки зрения при испытаниях были неблагоприятные условия. Парогазовая фаза эвакуируется из реакционной области главным образом через высокопроницаемый остаток конверсии к скважинам. Объем конвертируемой породы составил первые десятки дм³. Отношение этого объема к пропускной способности окружающей породы мало. Более того по причине проведения работ на разрезе вследствие воздействия механических напряжений приповерхностный слой более трещиноватый, т.е. имеет сниженное газодинамическое сопротивление. Перечисленные обстоятельства создают благоприятные условия для увеличения потерь газообразных продуктов. Помимо газа в процессе конверсии образуются и жидкие продукты, которые не учитывались в проведённых испытаниях, но их объем был существенен. Лабораторные исследования показали, что эти продукты могут быть весьма ценными и оказывать положительное влияние на общую эффективность конверсии. Таким образом, косвенная и опосредованная оценка эффективности показала высокое значение (0,49) если взять во внимание неблагоприятные условия конверсии, не учтённые жидкие продукты, не оптимальные температурные режимы, низкий относительно теоретического максимума КПД установки.

Для сравнения электрофизической конверсии с промышленно внедрёнными решениями, т.е. ПГУ и ГРП, стоит учитывать технологические особенности и параметры применения конкретного способа. При рассмотрении подземных технологий на поверхности лежит вопрос бурения. Для каждой технологии под конкретные условия разрабатываются свои технические решения организации бурения скважин. Для ПГУ в основном используются сетки скважин, в том числе, со сбойками в забоях. При ГРП применяют куст горизонтальных скважин с общим устьем. Отталкиваясь от данных полученных при натурных испытаниях применение сетки скважин

потребуется шаг в 10÷20 м. Такой шаг короткий и потребует большого количества скважин для покрытия большой площади пласта, что сделает применение способа нерентабельным. Кроме того, после выработки некоторого объёма и перехода к соседнему будут оставаться нетронутые фрагменты, т.е. потери сырья. Если не оставлять эти фрагменты, то при соприкосновении текущей области с предыдущей путь протекания тока резко изменится, что существенно усложнит выдерживание технологических режимов. Более оптимальным вариантом будет бурение двух параллельных горизонтальных скважин с помещением электродов в забоях и вытягивание электродов по мере конверсии. Так при минимальном количестве скважин можно достичь максимальной выработки. В любом случае для электрофизической конверсии, ПГУ и ГРП бурение является неотъемлемой частью и влияет на рентабельность в зависимости от конкретно заданных условий. Так, например, большая глубина приведёт к необходимости большего нагрева дутья при ПГУ, большего количества жидкости, реагентов и пропанта и увеличению затухания ударной волны при ГРП, более длинным, а, следовательно, высокоомным проводам при электрофизической конверсии, что приведёт к потерям энергии.

Опосредованная оценка эффективности электрофизической конверсии показала значения близкие к ПГУ, 49 % и 60 % соответственно. С учётом всех неблагоприятных условий этот показатель для рассматриваемого способа может быть гораздо выше. Провести аналогичное сравнение с ГРП затруднительно, т.к. подробные технические данные являются коммерческой тайной, в дополнение к этому принцип действия ГРП совершенно другой. Стоит подчеркнуть, что при гидроразрыве органическая компонента не перерабатывается полностью, из неё извлекается газообразная и легкорастворимая фракция, т.е. степень переработки сырья у этой технологии низкая. Более того попытки внедрить ГРП повсеместно не дали положительных результатов в связи с низкой универсальностью способа.

Рассматривая конечные продукты переработки ИТТ ПГУ позволяет получать горючие газы с большим содержанием балласта ~70 %, при этом управление составом конечных продуктов сильно затруднено и возможно лишь теоретически. При ГРП продукты более калорийные и универсальные для конечной утилизации, т.к. по сути представляют собой природный газ. Однако это обстоятельство не перекрывает недостатков гидроразрыва. Электрофизической конверсией можно получать калорийные продукты с низким содержанием балластного газа и в некоторых пределах управлять составом продуктов. Один из вариантов, применение предлагаемого способа в качестве источника водорода, т.к. даже при неотработанных режимах это основной компонент газообразных продуктов.

Таким образом, электрофизическая конверсия обладает большим потенциалом технологического применения. На первый взгляд весьма универсальна, эффективна и обладает

рядом преимуществ перед промышленными аналогами. Однако на текущем этапе сложно спрогнозировать какие дополнительные технологические и технические решения понадобятся для реализации предлагаемого способа. Например, какие буровые технологии, электродные системы и т.д. Для уточнения влияния совокупности перечисленных нюансов на технологические параметры электрофизической конверсии необходимы дальнейшие детальные исследования.

Выводы по главе

Использование бетонной подушки на испытательной площадке в рамках полигона позволяет имитировать кровельные породы. Бетон в совокупности с преенторами и герметично установленными проходными изоляторами препятствует свободному выходу газообразных и аэрозольных продуктов электрофизической конверсии непосредственно из реакционной зоны в атмосферу. Это позволяет осуществить физическое моделирование всех этапов конверсии с отбором получаемых продуктов для последующего их анализа.

Обеспечиваемый испытательной установкой диапазон мощностей позволяет реализовать весь цикл конверсии на разрезе «Богатырь» при расстоянии между скважинами 1,5 м. КПД установки при этом 74 %. Электрофизическая конверсия ископаемых твердых топлив успешно проведена в полевых условиях с получением газообразных и жидких горючих продуктов. Оборудование можно использовать в опытных и оценочных работах для уточнения требований к промышленным агрегатам. Однако, для оптимизации использования потенциала силовых узлов и временных затрат необходима доработка установки. Главным образом необходимо разделить диапазон мощностей в области до ~ 10 кВ и ~ 10 А на два с повышением мощности каждого агрегата используемого для этих поддиапазонов. Так же для более глубокой степени конверсии с целью более детального анализа конечных продуктов необходимо существенное увеличение тока нагрузки.

Для начальной стадии формирования проводящего канала во фрагменте угольного пласта в полевых условиях на разрезе «Богатырь» требуется напряжение до 2 кВ. При этом увеличение межэлектродного расстояния с 1,5 м до 5,8 м не приводит к увеличению необходимого напряжения. Экстраполируя экспериментальные данные можно полагать, что этот уровень напряжения будет достаточен и для больших расстояний $\sim 10\div 20$ м. При этом необходимо учитывать, что для осуществления полного цикла конверсии с увеличением расстояния между скважинами потребуется увеличение обеспечиваемого оборудованием тока. Это связано со снижением плотности тока при увеличении расстояния между скважинами и преобладанием этого эффекта над увеличением погонного сопротивления.

По предварительной опосредованной оценке натурных испытаний электрофизическая конверсия видится перспективным для внедрения способом. Несмотря на неблагоприятные условия испытаний, рассматриваемая технология относительно эффективна. Позволяет получать газообразные продукты с теплотворной способностью $\sim 10,91$ МДж/м³ и низким содержанием до 15 % балластных продуктов.

Заключение

Основные выводы и результаты выполненной работы, соответствующие сформулированным задачам в рамках цели исследования электрофизической конверсии ископаемых твёрдых топлив:

1. Разработана и сконструирована схема измерения параметров частичных разрядов в ископаемых твёрдых топливах соответствующая рекомендациям международного стандарта ИЕС 60270 и специализированной литературы.

2. Проведён анализ ископаемых твёрдых топлив с точки зрения электрофизических свойств материала. ИТТ относятся к весьма гетерогенному материалу нерегулярного строения и состава. Электрофизические свойства компонент, слагающих ИТТ варьируются в весьма широких пределах. В связи с этим подавляющее большинство ИТТ относятся к слабопроводящим материалам с высокой степенью низкочастотной поляризации. Электрофизические характеристики породы динамически нелинейно изменяются при воздействии джоулева тепла. Сопротивление фрагмента породы изменяется на несколько порядков при пробое и дальнейшей карбонизации породы.

3. Измерены напряжённость и напряжение возникновения частичных разрядов в горючих сланцах месторождения Хуадянь (Китай). При межэлектродных расстояниях 50 ± 5 мм и 200 ± 10 мм эти параметры составляют 580 В и 790 В соответственно и 11,6 В/мм и 3,9 В/мм, т.е. при увеличении расстояния в ~ 4 раза, напряжение возникновения возрастает на $\sim 30\%$, а напряженность возникновения снижается в ~ 3 раза.

4. Проведён анализ механизмов распределения заряда и проводимости ископаемых твёрдых топлив. К основным механизмам можно отнести:

- a. - Накопление носителей заряда на границе раздела материалов с различной проводимостью и диэлектрической проницаемостью, т.е. эффект Максвелла-Вагнера
- b. - Увеличение напряжённости электрического поля на микровключениях с низкой диэлектрической проницаемостью
- c. - Увеличение локальной напряженности на структурах типа острий
- d. - Неравномерное падение напряжения по объему породы, из-за различной проводимости отдельных её фрагментов.

5. Осуществлена электрофизическая конверсия ИТТ в лабораторных условиях при различных режимах нагрева. Установлена возможность изменения состава конечных продуктов управлением мощности в условиях динамически изменяющегося сопротивления породы. Получены жидкие продукты, близкие по свойствам к природной нефти.

6. Разработана и введена в эксплуатацию полевая опытная установка для электрофизической конверсии ИТТ.

7. Проведены натурные испытания электрофизической конверсии ископаемых твёрдых топлив. Результаты этих испытаний показали применимость электрофизической конверсии в полевых условиях. Определено значение напряжения (до 2 кВ) необходимого для опытных полевых работ при межэлектродном расстоянии до 5,8 м.

8. Установлено, что при увеличении расстояния между скважинами с 1,5 м до 5,8 м сопротивление фрагмента угольного пласта снижается с 400 Ом до 300 Ом, из-за преобладания растекания тока по объёму породы над увеличением погонного сопротивления.

9. Даны рекомендации по модернизации опытной установки с целью увеличения обеспечиваемого тока и возможности осуществления полного цикла конверсии глубокой степени на расстояниях более 6 м.

10. Предварительные оценки электрофизической конверсии показали высокий потенциал использования этого способа. При неблагоприятных условиях испытаний и не оптимизированной аппаратной реализации получена эффективность сопоставимая с ПГУ.

Литература

1. Hongzhi R. Zhanga Underground in situ coal thermal treatment for synthetic fuels production / Hongzhi R. Zhanga, Suhui Lib, Kerry E. Kellya, Eric G. Eddingsa // Progress in Energy and Combustion Science. – 2017. Vol. 62. – P.1–32.
2. Alan K. Burnham Comparison of the acceptability of various oil shale processes // 26th Oil Shale Symposium (Golden, Colorado, USA, 16—19 Oct.,2006). – Colorado School of Mines, 2006. – P.1–11.
3. Стрижакова Ю.А. Процессы переработки горючих сланцев. История развития. Технологии / Ю.А. Стрижакова, Т.В. Усова; под. ред. А.Л. Лapidуса. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2008. – 120 с.
4. Pat. 20100319909A1 US, Int. Cl. E21B 43/30, E21B 43/247, E21B 43/12. Enhanced shale oil production by in situ heating using hydraulically fractured producing wells / Symington W. A., Kaminsky R. D., Hutfilz J. M. ; Exxonmobil upstream research company. – № 12/712904 ; field. 25.02.10 ; pub. 23.12.10, 40 p. : ill.
5. Pat. 4524826 US, Int. Cl. E21B 43/00. Method of heating an oil shale formation / K. D. Savage ; Texaco Inc. – № 387996 ; filed. 14.06.82 ; pub. 25.06.85, 5 p. : ill.
6. Pat. 9410408B2 US, Int. Cl. E21B 43/24. Electrical heating of oil shale and heavy oil formations / B. O. Clark, R. L. Kleinberg, N. V. Seleznev ; Schlumberger technology corporation. – № 13/795832 ; filed. 12.03.13 ; pub. 09.08.16, 19 p. : ill.
7. Pat. 2003/0085034 A1 US, Int. Cl. E21B 43/24. In situ processing of a coal formation to produce pyrolysis products / S. L. Wellington, H. J. Vinegar, E. Zhang, A. M. Madgavkar ; Del Christensen shell oil company. – № 09/841289 ; filed. 24.04.01 ; pub. 08.05.03, 370 p. : ill.
8. Pat. 2003/0066644 A1 US, Int. Cl. E21B 43/243. In situ thermal processing of a coal formation using a relatively slow heating rate / J. M. Karanikas, H. J. Vinegar, S. L. Wellington, E. P. de Rouffignac, I. E. Berchenko, G. L. Stegemeier, E. Zhang, T. D. Fowler, R. C. Ryan ; Del Christensen shell oil company. – № 09/841449 ; filed. 24.04.01 ; pub. 10.04.03, 372 p. : ill.
9. Pat. 6929067 B2 US, Int. Cl. E21B 43/00. Heat sources with conductive material for in situ thermal processing of an oil shale formation / H. J. Vinegar, R. M. Bass, B. G. Hunsucker ; Shell oil company. – № 10/128698 ; filed. 24.04.02 ; pub. 16.08.05, 422 p. : ill.
10. Pat. 8608249 B2 US, Int. Cl. E21B 43/28. Heat sources with conductive material for in situ thermal processing of an oil shale formation / H. J. Vinegar, E. P. de Rouffignac, K. A. Maher, L. G. Shoeling, S. L. Wellington ; Shell oil company. – № 12/767572 ; filed. 26.04.10 ; pub. 17.12.13, 317 p. : ill.

11. Pat. 6715546 B2 US, Int. Cl. E21B 43/24. In situ production of synthesis gas from a hydrocarbon containing formation through a heat sourceswellbore / H. J. Vinegar, S. L. Wellington, E. P. de Rouffignac, I. E. Berchenko, G. L. Stegemeier, R. M. Van Hardeveld ; Shell oil company. – № 09/841290 ; filed. 24.04.01 ; pub. 06.04.04, 253 p. : ill.
12. Pat. 2015/095926 A1 WO, Int. Cl. E21B 43/24. A method, a system and an apparatus for in situ processing of an oil shale formation / D. N. Pritchard ; Shale energy limited. – № PCT/AU2014/050407 ; filed. 10.12.14 ; pub. 02.07.15, 59 p. : ill.
13. Symington W.A. Field testing of Electrofrac™ process elements at ExxonMobil's Colony Mine // 29th Oil Shale Symposium (Golden, Colorado, USA, 19—20 Oct.,2009). – Colorado School of Mines, 2009. – Vol. 1. – P.1–13.
14. Symington W.A. ExxonMobil's Electrofrac™ Process for In Situ Oil Shale Conversion // AAPG Annual Convention & Exhibition (San Antonio, Texas, USA, 21 Apr.,2008). – Oil Shale: A Solution to the Liquid Fuel Dilemma. – 2010. - Vol. 1032. – P.185–216.
15. Крейнин Е.В. Нетрадиционные углеводородные источники: новые технологии их разработки: Монография / Е.В. Крейнин. – М.: ООО «Проспект», 2016. – 208 с.
16. А. с. 28274 СССР, Класс 24 е, 3. Способ и устройство для газификации ископаемых углей непосредственно в недрах земли / И. П. Кириченко (СССР). – № 79210 ; заявл. 21.11.30 ; опубл. 30.11.32, 8 с. : ил.
17. А. с. 45710 СССР, Класс 24 е, 3. Способ подземной газификации угля / И. П. Кириченко, В. С. Тон, В. А. Бертолло (СССР). – № 161926 ; заявл. 30.01.35 ; опубл. 31.01.36, 3 с. : ил.
18. А. с. 51226 СССР, Класс 5 б, 42. Способ подготовки каменноугольных месторождений для подземной газификации посредством проведения сбоек струей воды под давлением / В. А. Матвеев (СССР). – № 186869 ; заявл. 14.02.36 ; опубл. 30.06.37, 3 с. : ил.
19. А. с. 87035 СССР, Класс 24 е, 3. Способ подземной газификации твердых горючих / Д. П. Октябрьский (СССР). – № 385946 ; заявл. 15.10.48 ; опубл. 28.07.64, Бюл. № 21. – 2 с. : ил.
20. Greg Perkins Overview of underground coal gasification operations at Chinchilla, Australia / Greg Perkins, Ernest du Toit, Greg Cochrane & Grant Bollaert // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. – 2016. Vol. 38, № 24. – P.3639–3646.
21. Sunhua Deng Sub-critical water extraction of bitumen from Huadian oil shale lumps / Sunhua Deng, Zhijun Wang, Yan Gao, Qiang Gu, Xuejun Cui, Hongyan Wang // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2012. Vol. 98. – P.151–158.

22. Greg Perkins Underground coal gasification – Part I: Field demonstrations and process performance / Greg Perkins // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2018. Vol. 67. – P.158–187.
23. Greg Perkins Underground coal gasification – Part II: Fundamental phenomena and modeling / Greg Perkins // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2018. Vol. 67. – P.234–274.
24. J David Hughes Energy: A reality check on the shale revolution / J David Hughes // *Nature*. – 2013. Vol. 494. – P.307–308.
25. Robert W. Howarth Natural gas Should fracking stop? / Robert W. Howarth, Anthony Ingraffea & Terry Engelder // *Nature*. – 2011. Vol. 477. – P.271–275.
26. Barth-Naftilan E. Treatise on Geophysics (Second Edition). 11.16 - Unconventional Fossil Fuel Reservoirs and Water Resources / E. Barth-Naftilan, J.E. Saiers; Editor(s): Gerald Schubert. – Elsevier, 2015. – P.557–570.
27. Тетельмин В.В. Сланцевые углеводороды. Технологии добычи. Экологические угрозы. / В.В. Тетельмин, В.А. Язев, А.А. Соловьянов. – Долгопрудный.: ИД «Интеллект», 2014. – 296 с.
28. Song Y. A comparative geochemistry study of several oil shale-bearing intervals in the Paleogene Huadian Formation, Huadian Basin, Northeast China // Y. Song, Z. Liu, P. Sun, Q. Meng, R. Liu // *Journal of Earth Science*. – 2017. Vol. 28. – P.645–655.
29. Агроскин А.А. Физические свойства угля / А.А. Агроскин. – М.: Metallurgizdat, 1961. – 306 с.
30. Богородская Л.И. Кероген: Методы изучения, геохимическая интерпретация / Л.И. Богородская, А.Э. Конторович, А.И. Ларичев. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2005. – 254 с.
31. Savest N. Interaction of Estonian kukersite with organic solvents: A volumetric swelling and molecular simulation study / N. Savest, V. Oja, T. Kaevand, Ü. Lille // *Fuel*. – 2007. Vol. 86. – P.17–21.
32. Vandenbroucke M. Review. Kerogen origin, evolution and structure / M. Vandenbroucke, C. Largeau // *Organic Geochemistry*. – 2007. Vol. 38. – P.719–833.
33. Josh M. Laboratory characterisation of shale properties / M. Josh, L. Esteban, C. Delle Piane, J. Sarout, D.N. Dewhurst, M.B. Clennell // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2012. Vol. 88-89. – P.107–124.
34. Curtis M. E. Development of organic porosity in the Woodford Shale with increasing thermal maturity / M. E. Curtis, B. J. Cardott, C. H. Sondergeld, C. S. Rai // *International Journal of Coal Geology*. – 2012. Vol. 103. – P.26–31.

35. Loucks R.G. Morphology, Genesis, and Distribution of Nanometer-Scale Pores in Siliceous Mudstones of the Mississippian Barnett Shale / R.G. Loucks, R.M. Reed, S.C. Ruppel, D.M. Jarvie // *Journal of Sedimentary Research*. – 2009. Vol. 79. – P.848–861.
36. Чистяков Д.Н. Справочник по химии и технологии твердых горючих ископаемых / Д.Н. Чистяков, Д.А. Розенталь, Н.Д. Русьянова, В.И. Сухоруков, Ю.А. Филоненко, Н.В. Франценюк, А.Д. Белянский, И.И. Лиштван, А.П. Гаврильчик, М.Г. Рудин, С.Я. Соболев; под ред. А. Н. Чистякова. – СПб.: Изд. компания "Синтез", 1996. – 362 с.
37. Дортман Н.Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика. / Г.М. Авчян, Е.И. Баюк, А.К. Вейнберг, Н.Б. Дортман, И.Ф. Зотова, В.Н. Иванов, М.Г. Илаев, Г.П. Капралов, М.Ш. Магид, У.И. Моисеенко, М.Л. Озерская, Э.И. Пархоменко, И.В. Розенталь, А.А. Смыслов, А.П. Тарков, А.Г. Тархов, С.А. Топорец, Н.А. Туезова, В.В. Федынский, А.Д. Фролов, А.Н. Храмов, Т.З. Чадович; под ред. Н.Б. Дортмана, – 2-е изд., перераб и доп. – М.: Недра, 1984. – 455 с.
38. Glover P.W.J. Treatise on Geophysics (Second Edition). 11.04 - Geophysical Properties of the Near Surface Earth: Electrical Properties / P.W.J. Glover; Editor(s): Gerald Schubert. – Elsevier, 2015. – P.89–137.
39. Котяхов Ф.И. Основы физики нефтяного пласта / Ф.И. Котяхов. – М.: Изд-во нефтяной и топливной литературы, 1956. – 364 с.
40. Осипов В.И. Микроструктура глинистых пород / В.И. Осипов, В.Н. Соколов, Н.А. Румянцева; под ред. Академика Е.М. Сергеева. – М.: Недра, 1989. – 211 с.
41. Топорец С.А. Исследование некоторых физических свойств ископаемых углей / С.А. Топорец, Н.Б. Дортман, В.Я. Трунина // *Труды АН СССР*. – 1962. – Выпуск XVI. – С.197–263.
42. Ладынин А.В. Физические свойства горных пород: учебное пособие / А.В. Ладынин. – Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т, 2010. – 101 с.
43. Сканапи Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей) / Г.И. Сканапи. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1958. – 907 с.
44. Каляцкий, И. И. Разрушение каменных углей и горных пород импульсными разрядами высокого напряжения : дис. ... канд. тех. наук : 05.14.12 : защищена 22.01.53 : утв. 15.07.53 / Каляцкий Иван Иванович. – Томск., 1953. – 182 с. – Библиогр.: с. 174–179. – Р-719.
45. Эйтель В. Физическая химия силикатов / В. Эйтель. – М.: Иностранная литература, 1962. – 1056 с.
46. Kuffel E. High Voltage Engineering. Fundamentals. Second edition / E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. – 539 pp.

47. Densley J. Ageing mechanisms and diagnostics for power cables—an overview / J. Densley // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2001. – Vol. 17. – P.14–22.
48. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях / Г.С. Кучинский. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. – 224 с.
49. Вдовико В. П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования / В.П. Вдовико. – Новосибирск: Наука, 2007. – 155 с.
50. Chen G. Electrical Treeing Characteristics in XLPE Power Cable Insulation in Frequency Range between 20 and 500 Hz / G. Chen, C.H. Tham // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2009. – Vol. 16. – P.179–188.
51. Champion J.V. An approach to the modelling of partial discharges in electrical trees / J.V. Champion, S.J. Dodd // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1998. – Vol. 31. – P.2305–2314.
52. Шувалов М.Ю. Развитие водных триингов в экструдированной кабельной изоляции как электрический эффект Ребиндера. Часть 1 / М.Ю. Шувалов, Ю.В. Образцов, В.Л. Овсиенко, П.Ю. Удовицкий, А.С. Мнека // Наука и техника. – 2006. – №4 – С.14–19.
53. Holto J. Electrical Tree Growth in Extruded s-Polypropylene // 2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application (New Orleans, LA, USA, 11–14 Oct., 2010). – IEEE, 2010. – P.373–376.
54. Dodd S.J. Partial Discharge Patterns in Conducting and Non-Conducting Electrical Trees // 2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics (Potsdam, Germany, 04–09 Jul., 2010). – IEEE, 2010. – P.1–4.
55. Шваб А. Измерения на высоком напряжении: Измерительные приборы и способы измерения / А. Шваб; 2-е изд., перераб. и доп. Пер. с нем. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с.
56. International standard IEC 60270:2000(E) Third edition 2000-12 High-voltage test techniques – Partial discharge measurements.
57. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования / В.А. Русов. – Екатеринбург.: Издательство УрГУПС, 2011. – 367 с.
58. Martemyanov S.M. Investigation of pyrolytic decomposition of oil shale by plasma / S.M. Martemyanov, V.V. Lopatin // Izvetiya vuzov. Fizika. – 2012. – Vol. 55. – P.110–112.
59. Аронов С.Г. Комплексная химико-технологическая переработка углей / С.Г. Аронов, М.Г. Скляр, Ю.Б. Тютюнников. – Киев: Техніка, 1968. – 262 с.
60. Хисин Я. И. Термическое разложение горючих сланцев / Я.И. Хисин. – Ленинград: «Красный печатник», 1948. – 199 с.
61. Агроскин А.А. Химия и технология угля / А.А. Агроскин. – М.: «Недра», 1969. – 240 с.

62. Martemyanov S.M. Partial discharge Inception mechanisms in oil shale / S.M. Martemyanov, A.A. Bukharkin // Russian Physics Journal. – 2022. – № 4. – С.589–597.
63. Пентин Ю.А. Физика и химия твердого состояния органических соединений. Том 1. / Пер. с англ. под редакцией Ю.А. Пентина, – М.: Издательство «Мир», 1967. – 738 с.
64. Lopatin V.V. Investigation of the dielectric properties of oil shale / V.V. Lopatin, S.M. Martemyanov // Russian Physics Journal. – 2012. – Vol. 55. – P.511–515.
65. Mason J. H. Breakdown of solid dielectrics in divergent fields / J. H. Mason // Proceedings of the IEE - Part C: Monographs. – 1955. – Vol. 102. – P.254–263.
66. Chen X. Aging of Oil-impregnated Transformer Insulation Studied through Partial Discharge Analysis // 2010 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics (Potsdam, Germany, 04–09 Jul.,2010). – IEEE, 2010. – P.1–4.
67. Лопатин В.В. Триинг и электротепловой пробой углей и горючих сланцев / В.В. Лопатин, А.А. Бухаркин, С.М. Мартемьянов, И.А. Коряшов // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 55. – С.160–163.
68. Martemyanov S.M. Field test of in-situ conversion of coal / S.M. Martemyanov, A.A. Bukharkin, B.T. Ermagambet, Zh.M. Kasenova // International Journal of Coal Preparation and Utilization. – 2022. – Vol. 42. – P.3292–3302.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

Статья 2 квартиля по базам Web of Science и Scopus

1. Martemjyanov S.M. Field test of in-situ conversion of coal / S.M. Martemjyanov, A.A. Bukharkin, B.T. Ermagambet, Z.M. Kasenova // International Journal of Coal Preparation and Utilization. – 2022. – Vol. 42, № 11. – P.1-12. doi: 10.1080/19392699.2021.1957855

Прочие статьи, индексируемые в базах Scopus и WoS

2. Martemjyanov S.M. Measurement and Simulation of Partial Discharges in Solid Fuels / S.M. Martemjyanov, A.A. Bukharkin // Technical Physics. – 2022. – Vol. 67. – P.146–151. doi: 10.1134/S1063784222030033
3. Martemjyanov S.M. Partial Discharge Inception Mechanisms in Oil Shales / S.M. Martemjyanov, A.A. Bukharkin // Russian Physics Journal – 2022. – Vol. 65. – P.589-597. DOI: 10.1007/s11182-022-02673-7

Статьи из перечня ВАК

4. Лопатин В.В. Триинг и электротепловой пробой бурых углей и горючих сланцев / В.В. Лопатин, А.А. Бухаркин, С.М. Мартемьянов, И.А. Коряшов // Известия вузов. Физика. – 2013 – Т. 56, № 7/2. – С.160-163
5. Лопатин В.В. Применение разрядной плазмы для нагрева подземных пластов сланцев / В.В. Лопатин, А.А. Бухаркин, С.М. Мартемьянов, И.А. Коряшов // Известия вузов. Физика. – 2014 – Т. 57, №. 3/3. – С.184-186

Монография

6. Ермағамбет Б.Т. Технология подземной газификации угля путем электронагрева: Монография / Б.Т. Ермағамбет, Ж.М. Касенова, С.М. Мартемьянов, А.А. Бухаркин, М.К. Казанкапова. – Нур-Султан, издательство «Шанырак медиа», 2020. – 121 с.

Патенты на изобретение и полезную модель (Приложение Г)

7. Пат. 2521255 С1 Российская Федерация, МПК E21B 43/295. Способ подземной газификации / В.В. Лопатин, С.М. Мартемьянов, А.А. Бухаркин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО НИ ТПУ. – № 2012152881/03; заявл. 10.12.12; опубл. 27.06.14, Бюл. № 18. – 3 с. – ил.
8. Пат. 4737 Республика Казахстан на полезную модель,. Способ подземной газификации угля электрическим разрядом / Б.Т. Ермағамбет, С.М. Мартемьянов, Ж.М. Касенова, А.А. Бухаркин, Н.У. Нургалиев, М.К. Казанкапова; Зарегистрировано в Государственном реестре 27.02.2020.

Статьи в сборниках трудов конференций

9. Бухаркин, А.А. Электрофизическая *in situ* конверсия ископаемых твердых топлив как источник водорода / А.А. Бухаркин, С.М. Мартемьянов // Водород. Технологии. Будущее : Сборник тезисов докладов Всероссийской научно-практической конференции, Томск, 23–24 декабря 2020 года. – Томск: НИ ТПУ, 2021. – С. 16.
10. Касенова Ж.М. Опытные испытания по подземному нагреву угольного пласта на месторождении «Богатырь» / Ж.М. Касенова, Б.Т. Ермагамбет, С.М. Мартемьянов, А.А. Бухаркин // Углекислотная и экология Кузбасса : X Международный Российско-Казахстанский Симпозиум сборник тезисов докладов, Кемерово, 12–13 июля 2021 года. – Кемерово: Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты СО РАН, 2021. – С. 42. – DOI 10.53650/9785902305637_42
11. Касенова Ж.М. Физическое моделирование и опытные испытания подземного нагрева угольного пласта / Б.Т. Ермагамбет, С.М. Мартемьянов, Ж.М. Касенова, А.А. Бухаркин, Н.У. Нургалиев // Научно-практическая конференция «Угольная теплоэнергетика в Казахстане: проблемы, решения и перспективы развития»: Сборник тезисов выступлений, Нур-Султан, 27-28 февраля 2020 года. – Нур-Султан: NURIS, 2020. – С. 90-94.
12. Martemjyanov S.M. Composition of pyrolysis gas from oil shale at various stages of heating / S.M. Martemyanov, A.A. Bukharkin, I.A. Koryashov, A.A. Ivanov // 5th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects: Journal of Physics: Conference Series, Tomsk, 2-7 October 2016. – Tomsk: Published under licence by IOP Publishing Ltd, 2017. – P. 1-5.
13. Иванов А.А. Состав продуктов термоокислительного превращения органического вещества горючих сланцев при электрофизическом нагреве / Иванов А.А., Мартемьянов С. М., Бухаркин А. А., Савельев В. В., Головкин А. К. // Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций: сборник тезисов докладов, Томск, 21-25 сентября 2015. – Томск: ИФПМ СО РАН, 2015 - С. 605-606.
14. Bukharkin A.A. Modelling of underground geomechanical characteristics for electrophysical conversion of oil shale / A.A. Bukharkin, S.M. Martemjyanov, I.A. Koryashov, A.A. Ivanov // Gas Discharge Plasmas and Their Applications: Abstracts of 12th International Conference, Tomsk, 6-11 September, 2015. - Tomsk: Publishing House of IAO SB RAS, 2015. – P. 160.
15. Martemjyanov S.M. Electrothermal treeing application for Joule heating of oil shale / S.M. Martemjyanov, V.V. Lopatin, A.A. Bukharkin, I.A. Koryashov, A.A. Ivanov // Energy Fluxes and Radiation Effects: Book of Abstracts of International Congress, Tomsk, 21-26 September, 2014. – Tomsk: Publishing House of IAO SB RAS, 2014. – P. 474.
16. Bukharkin A.A. Electrical discharge phenomena application for solid fossil fuels *in-situ* conversion / A.A. Bukharkin, V.V. Lopatin, S.M. Martemjyanov, I.A. Koryashov // Energy Fluxes and

Radiation Effects: Book of Abstracts of International Congress, Tomsk, 21-26 September, 2014. – Tomsk: Publishing House of IAO SB RAS, 2014. – P. 180.

17. Nayman A.V. Setup the Physical Modeling of Underground Pyrolytic Conversion of Oil Shale / A.V. Nayman, A.A. Bukharkin, I.A. Koryashov // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XI Международной конференция студентов и молодых ученых, Томск, 22-25 Апреля 2014. – Томск: ТПУ, 2014 – С. 153-155.

18. Бухаркин А.А. Изменение электропроводности горючих сланцев под влиянием плазмы электротеплового пробоя / А.А. Бухаркин, И.А. Коряшов, С.М. Мартемьянов // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XI Международной конференция студентов и молодых ученых, Томск, 22-25 Апреля 2014. – Томск: ТПУ, 2014 - С. 44-46.

19. Мартемьянов С.М. Электрофизическая подземная конверсия как экологически безопасный способ комплексной разработки месторождений твердых топлив / С.М. Мартемьянов, В.В. Лопатин, А.А. Бухаркин, И.А. Коряшов // Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: материалы XIII международной конференции, Москва, 15-21 Сентября 2014. – Москва: РУДН, 2014 – С. 212-213.

20. Мартемьянов С.М. Подземная пиролитическая конверсия горючих сланцев / С.М. Мартемьянов, А.А. Бухаркин, В.В. Лопатин // Перспективы использования альтернативных и возобновляемых источников энергии в Украине: тезисы докладов международной научно-практической конференции, Судак, 9-13 Сентября 2013. - Киев: УкрГГРИ, 2013 - С. 86-87.

21. Мартемьянов С.М. Исследование напряжения электротеплового пробоя в бурых углях / С.М. Мартемьянов, А.А. Бухаркин, И.А. Коряшов // Современные техника и технологии: сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 15-19 Апреля 2013. – Томск: ТПУ, 2013 – Т. 1 – С. 70-71.

22. Коряшов И.А. Измерение характеристик частичных разрядов при электротепловом триинге в твердых топливах / И.А. Коряшов, А.А. Бухаркин, С.М. Мартемьянов // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов X Международной конференции студентов и молодых ученых, Томск, 23-26 Апреля 2013. – Томск: ТПУ, 2013 – С. 103-105.

23. Бухаркин А.А. Исследование электротеплового триинга в бурых углях и горючих сланцах / А.А. Бухаркин, С.М. Мартемьянов, И.А. Коряшов // Высокие технологии в современной науке и технике: сборник научных трудов II Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием: в 2 т., Томск, 27-29 Марта 2013. – Томск: ТПУ, 2013 – Т. 1 – С. 19-23.

24. Lopatin V.V. Underground pyrolytic conversion of oil shale / V.V. Lopatin, S.M. Martemjyanov, A.A. Bukharkin, I.A. Koryashov // 8th International Forum on Strategic Technology (IFOST - 2013): Proceedings: in 2 vol., Ulanbaatar, 28 June-1 July 2013. – Ulanbaatar: MUST, 2013 – Vol. 1 – P. 547-549.

Прочие публикации

25. Kasenova Z.M. Simulation of subterranean heating of coal by passing electrical current through electrothermal breakdown channel / Z.M. Kasenova, B.T. Ermagambet, G.E. Remnyov, S.M. Martemjyanov, A.A. Bukharkin, N.U. Nurgaliev // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2020. – Vol. 3, № 441. – P.16-23. doi: 10.32014/2020.2518-170X.49

26. Kasenova Z.M. Modeling of subterranean heating of coals of maykuben and ekibastuz basins / Z.M. Kasenova, B.T. Ermagambet, G.E. Remnyov, S.M. Martemjyanov, A.A. Bukharkin, N.U. Nurgaliev // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2019. – Vol. 6, № 438. – P.70-76. doi: 10.32014/2019.2518-170X.157

27. Ermagambet B.T. Dielectric properties of the coals of Maykuben and Ekibastuz basins / B.T. Ermagambet, G.E. Remnyov, S.M. Martemjyanov, A.A. Bukharkin, Zh.M. Kasenova, N.U. Nurgaliev // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Chemistry and Technology. – 2018. – Vol. 6, № 432. – P.38-45. doi: 10.32014/2018.2518-1491.24

28. Лопатин В.В. Подземная пиролитическая конверсия сланцев / В.В. Лопатин, С.М. Мартемьянов, А.А. Бухаркин // Oil and Gas Journal Russia. - 2014 - №. 9. - С. 50-53

Приложение А Дополнительные материалы по микроскопическим исследованиям горючих сланцев

Микрофотографии горючих сланцев Хуадяньского месторождения (Китай).

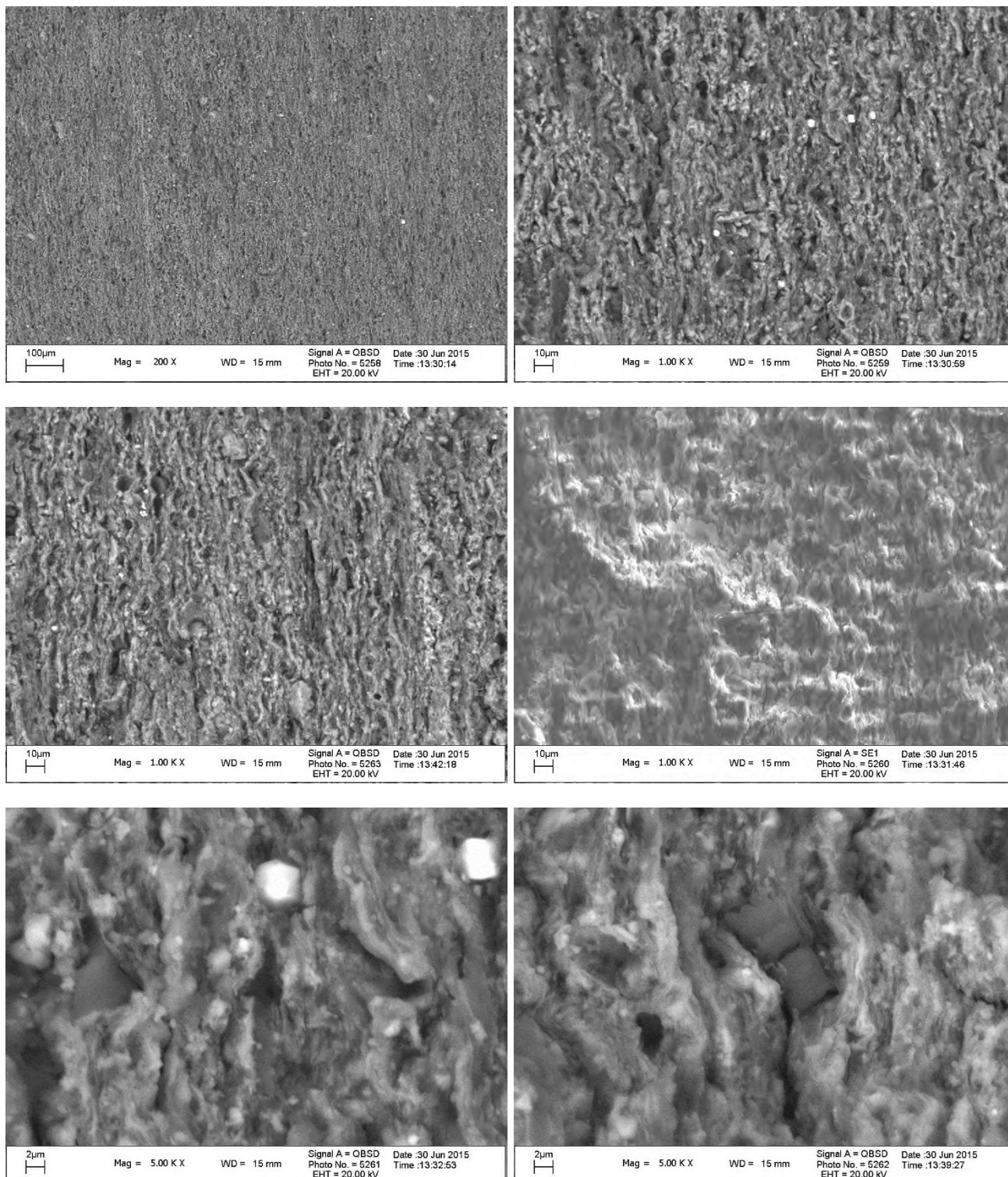


Рисунок А.1 – Микрофотографии горючих сланцев перпендикулярно слоям.

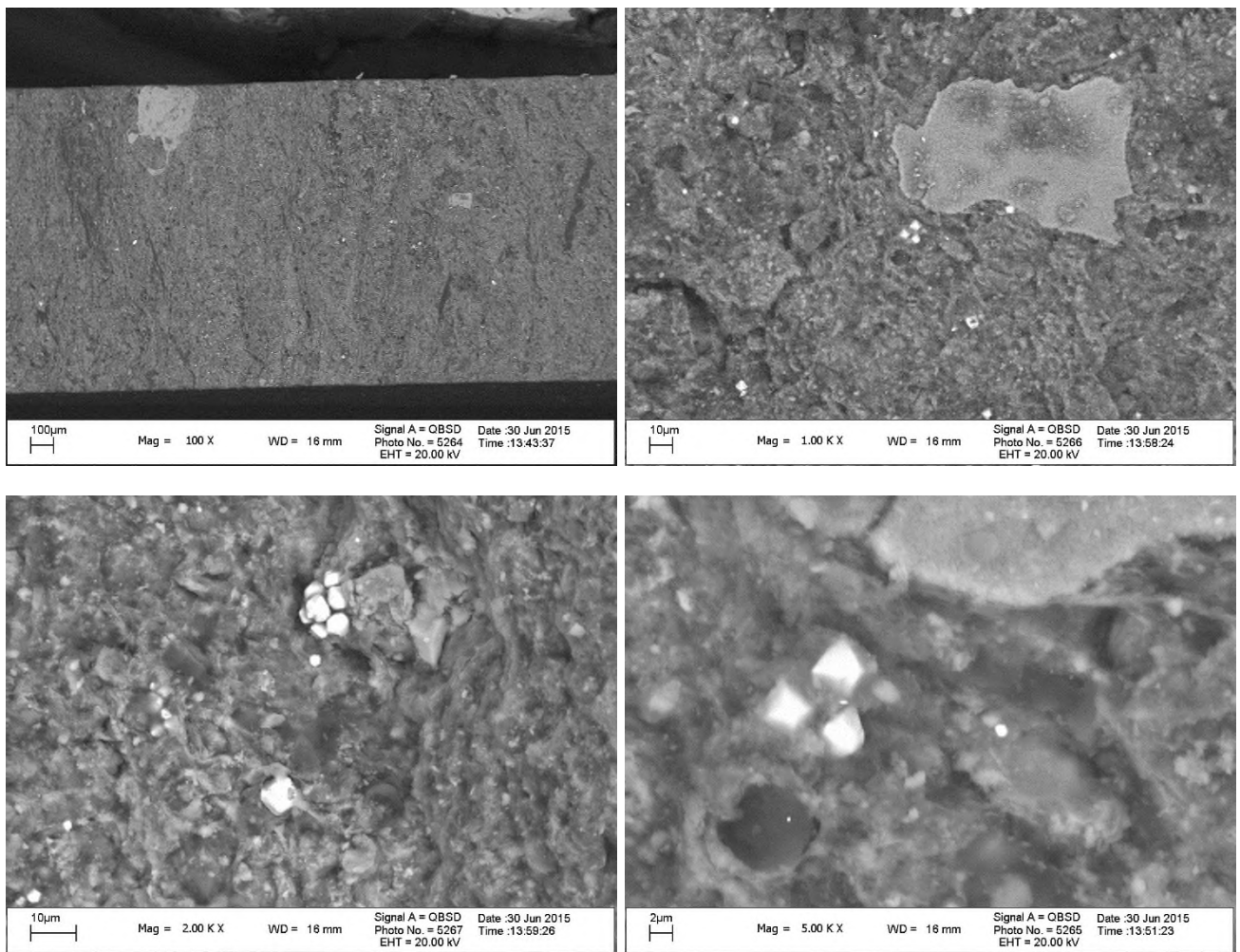
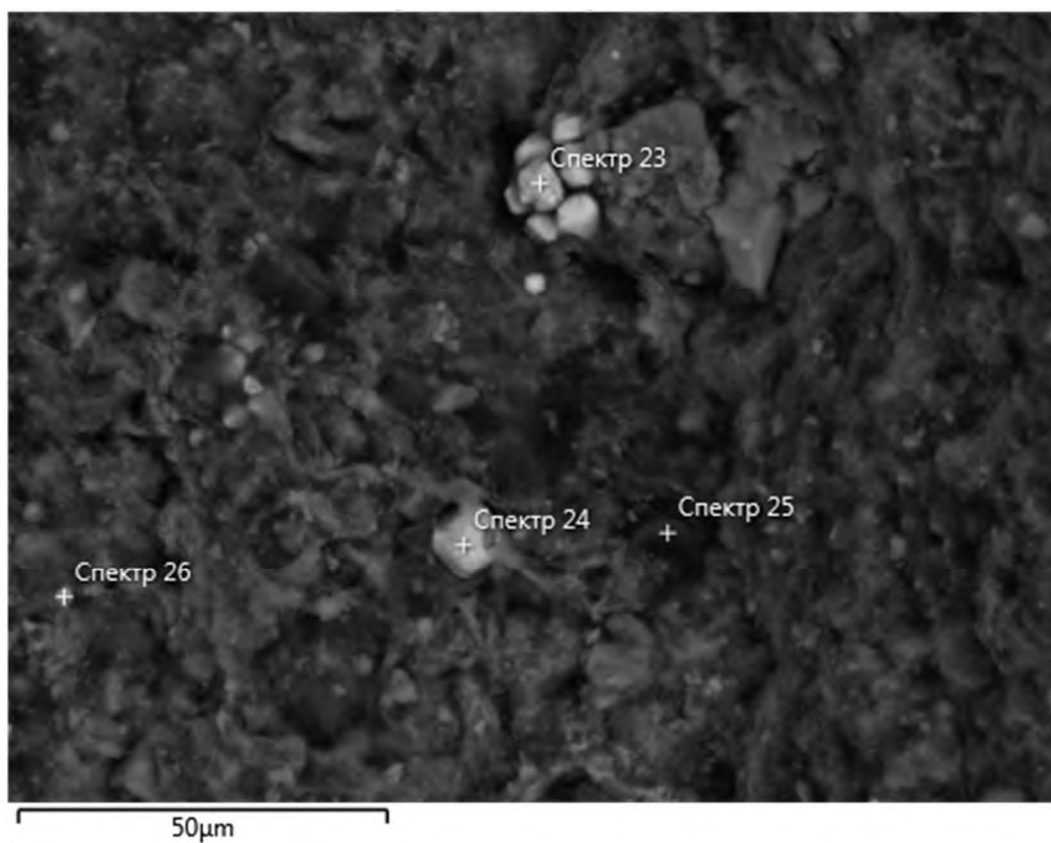
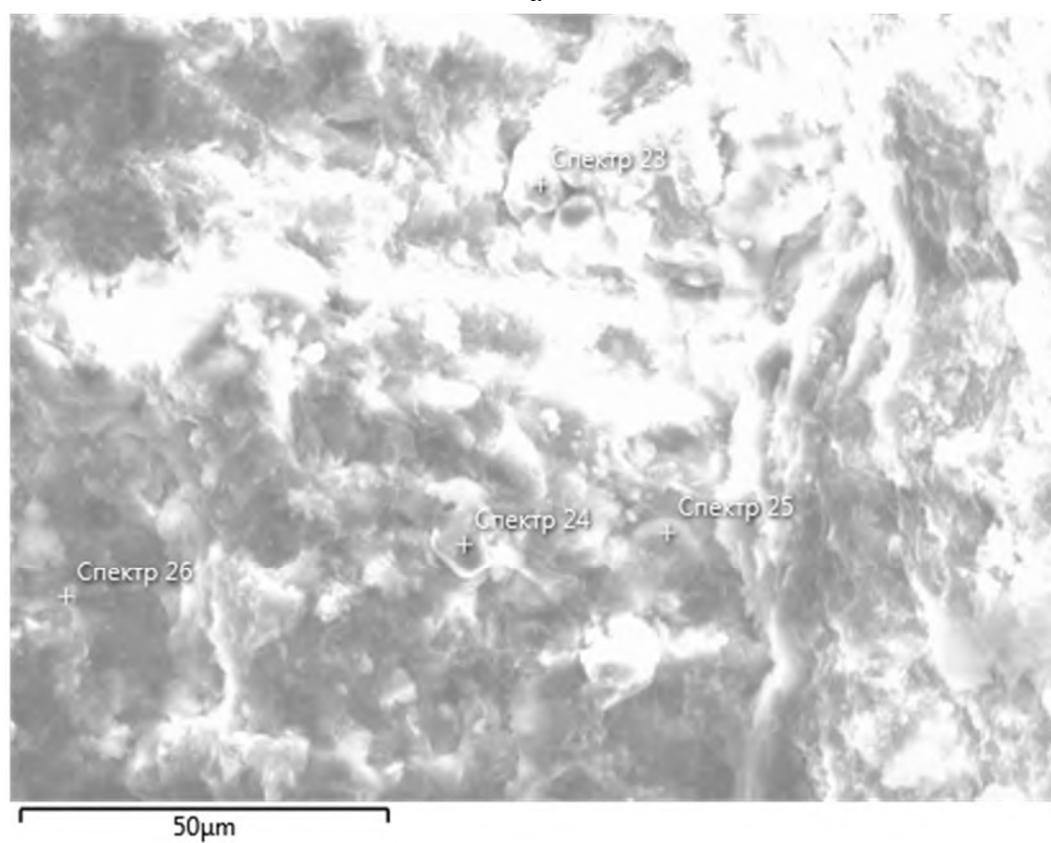


Рисунок А.2 – Микрофотографии горючих сланцев вдоль слоёв.



а



б

Рисунок А.3 – Микрофотография горючих сланцев с указанием точки захвата спектра, а – детектором отражённых электронов, б – детектором вторичных электронов.

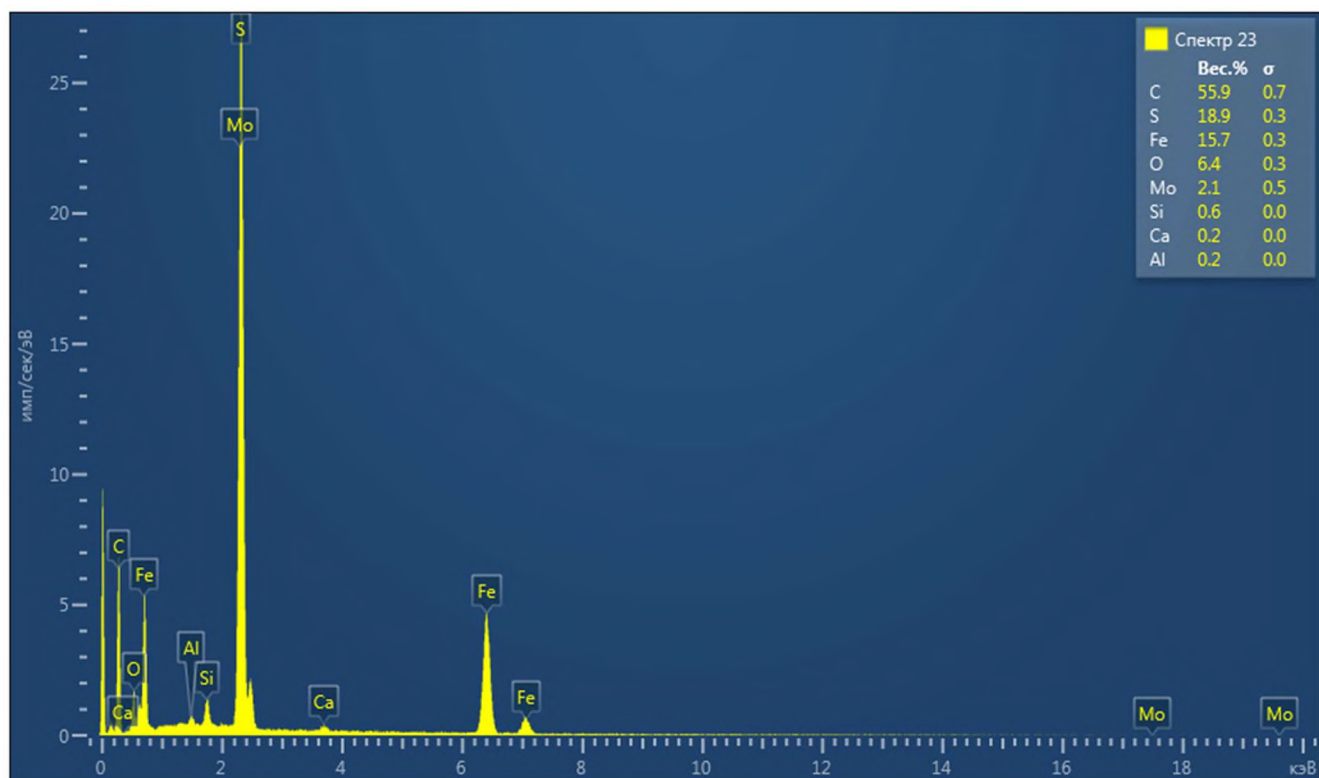


Рисунок А.4 – Массовый спектр 23.

Таблица А.1 – Массовый спектр 23.

Элемент	Тип линии	Вес. %	Сигма Вес. %	Атом. %
C	К серия	55,90	0,70	77,83
O	К серия	6,38	0,35	6,67
Al	К серия	0,20	0,04	0,13
Si	К серия	0,61	0,04	0,36
S	К серия	18,89	0,32	9,85
Ca	К серия	0,23	0,04	0,09
Fe	К серия	15,73	0,30	4,71
Mo	L серия	2,07	0,52	0,36
Сумма:		100,00		100,00

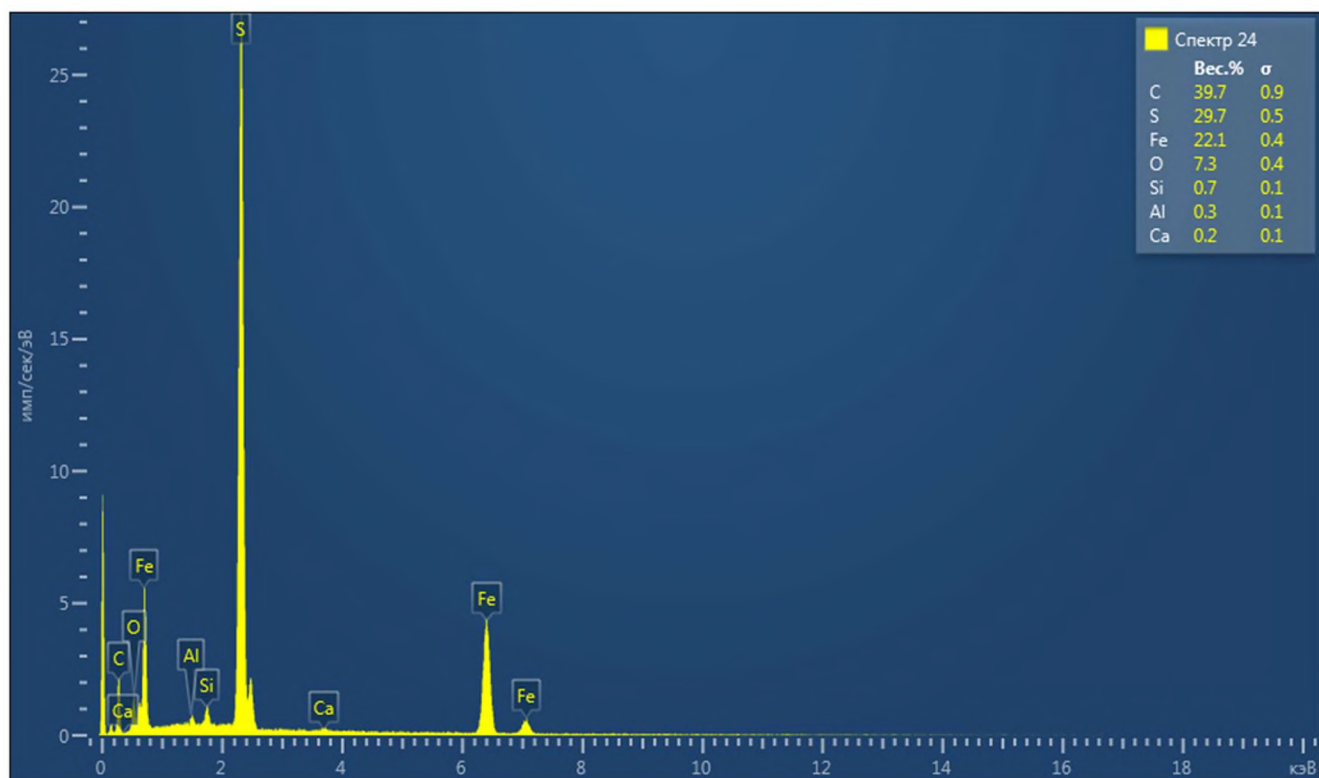


Рисунок А.5 – Массовый спектр 24.

Таблица А.2 – Массовый спектр 24.

Элемент	Тип линии	Вес. %	Сигма Вес. %	Атом. %
C	К серия	39,67	0,94	64,49
O	К серия	7,27	0,41	8,88
Al	К серия	0,34	0,06	0,24
Si	К серия	0,65	0,06	0,46
S	К серия	29,75	0,50	18,11
Ca	К серия	0,18	0,05	0,09
Fe	К серия	22,14	0,43	7,74
Сумма:		100,00		100,00

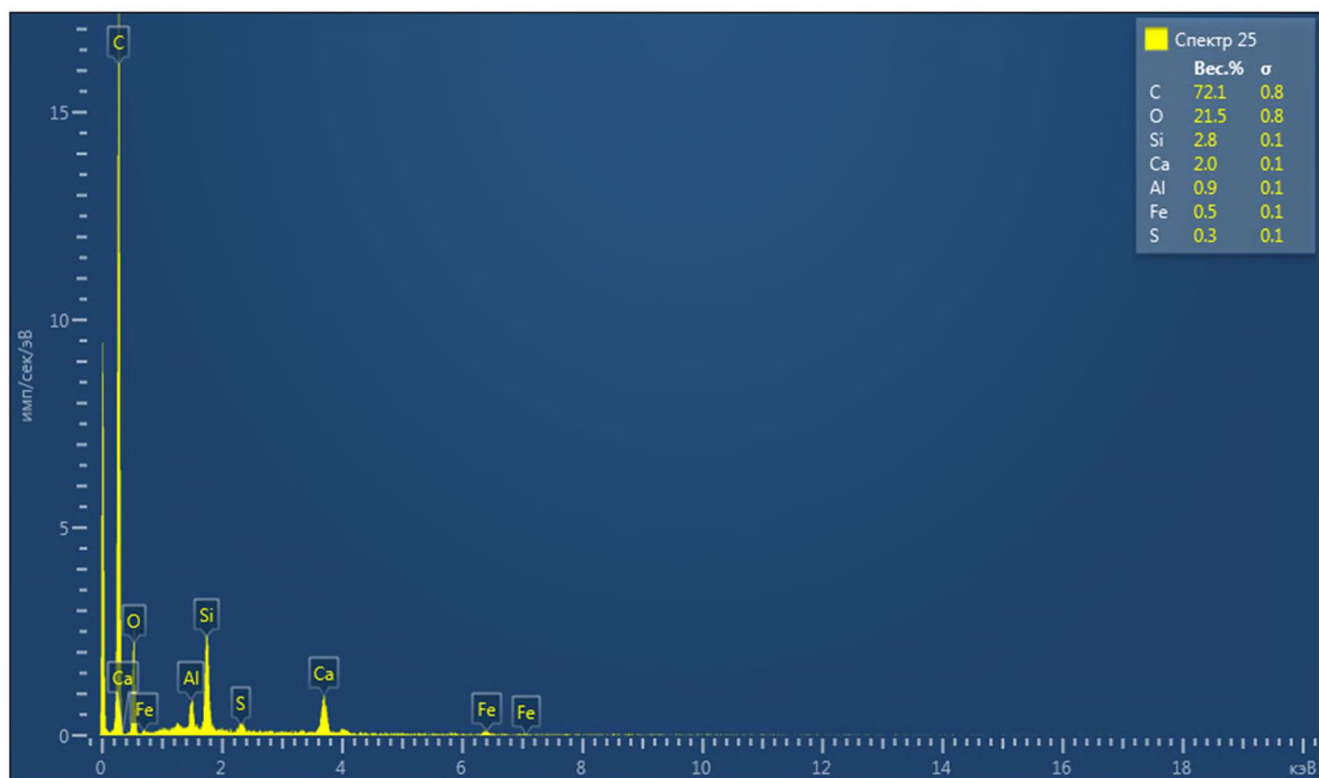


Рисунок А.6 – Массовый спектр 25.

Таблица А.3 – Массовый спектр 25.

Элемент	Тип линии	Вес. %	Сигма Вес. %	Атом. %
C	К серия	72,06	0,75	79,55
O	К серия	21,48	0,76	17,80
Al	К серия	0,87	0,08	0,43
Si	К серия	2,80	0,11	1,32
S	К серия	0,29	0,05	0,12
Ca	К серия	1,95	0,11	0,65
Fe	К серия	0,53	0,11	0,13
Сумма:		100,00		100,00

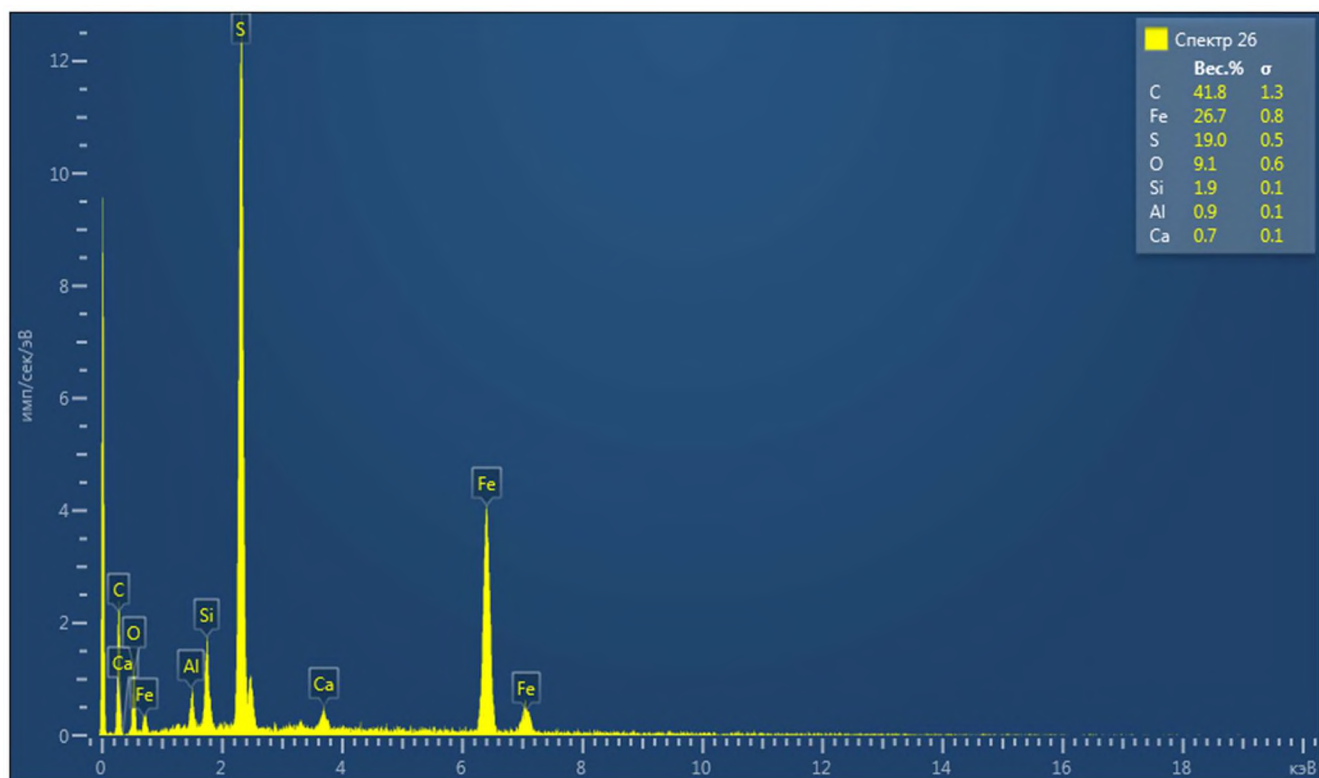
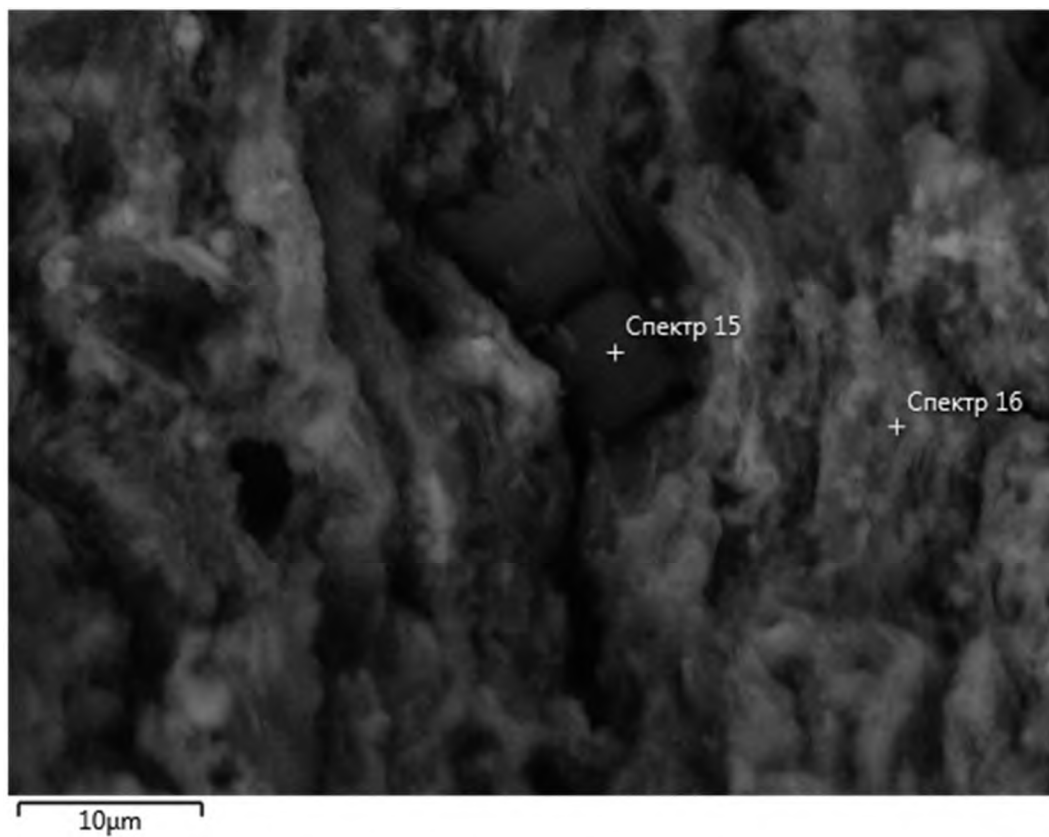


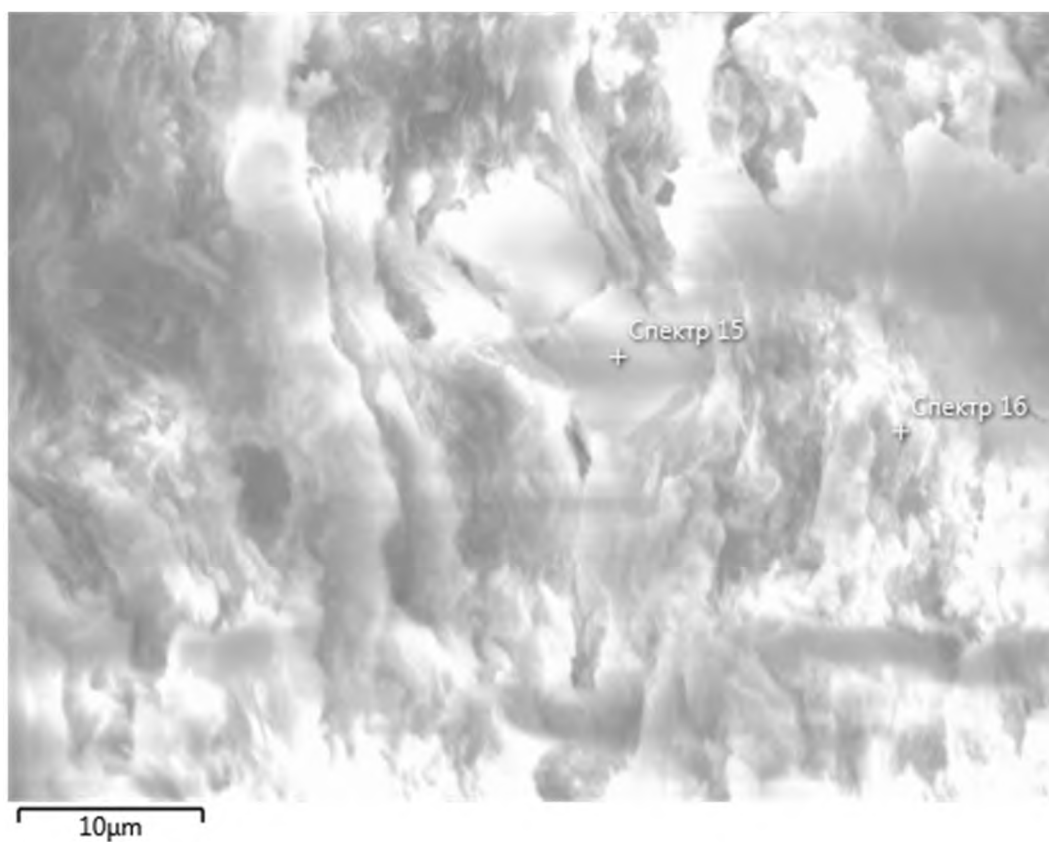
Рисунок А.7 – Массовый спектр 26.

Таблица А.4 – Массовый спектр 26.

Элемент	Тип линии	Вес. %	Сигма Вес. %	Атом. %
C	К серия	41,79	1,34	66,47
O	К серия	9,06	0,58	10,82
Al	К серия	0,94	0,10	0,67
Si	К серия	1,92	0,13	1,31
S	К серия	18,97	0,52	11,30
Ca	К серия	0,66	0,11	0,32
Fe	К серия	26,66	0,76	9,12
Сумма:		100,00		100,00



а



б

Рисунок А.8 – Микрофотография горючих сланцев с указанием точки захвата спектра, а – детектором отражённых электронов, б – детектором вторичных электронов..

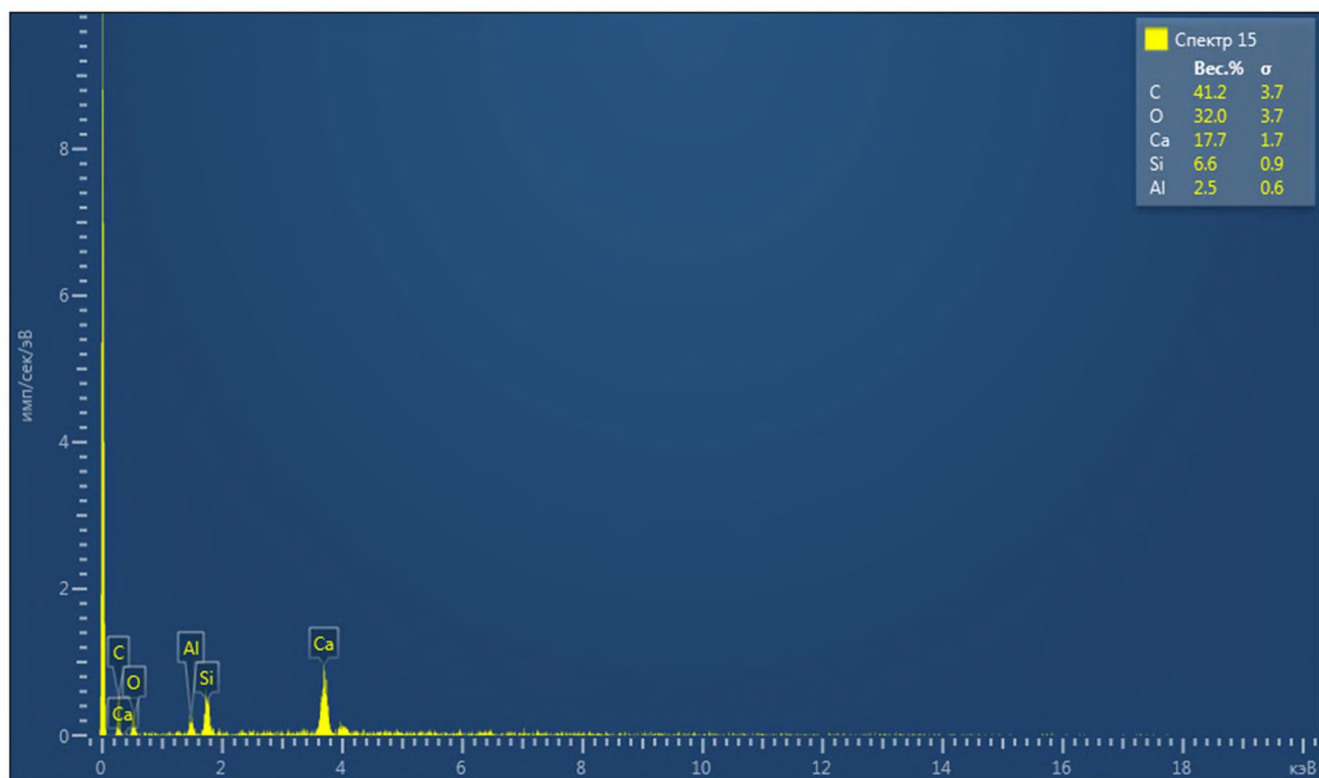


Рисунок А.9 – Массовый спектр 15.

Таблица А.5 – Массовый спектр 15.

Элемент	Тип линии	Вес. %	Сигма Вес. %	Атом. %
C	К серия	41,17	3,70	55,29
O	К серия	32,03	3,65	32,30
Al	К серия	2,51	0,55	1,50
Si	К серия	6,56	0,87	3,77
Ca	К серия	17,73	1,72	7,13
Сумма:		100,00		100,00

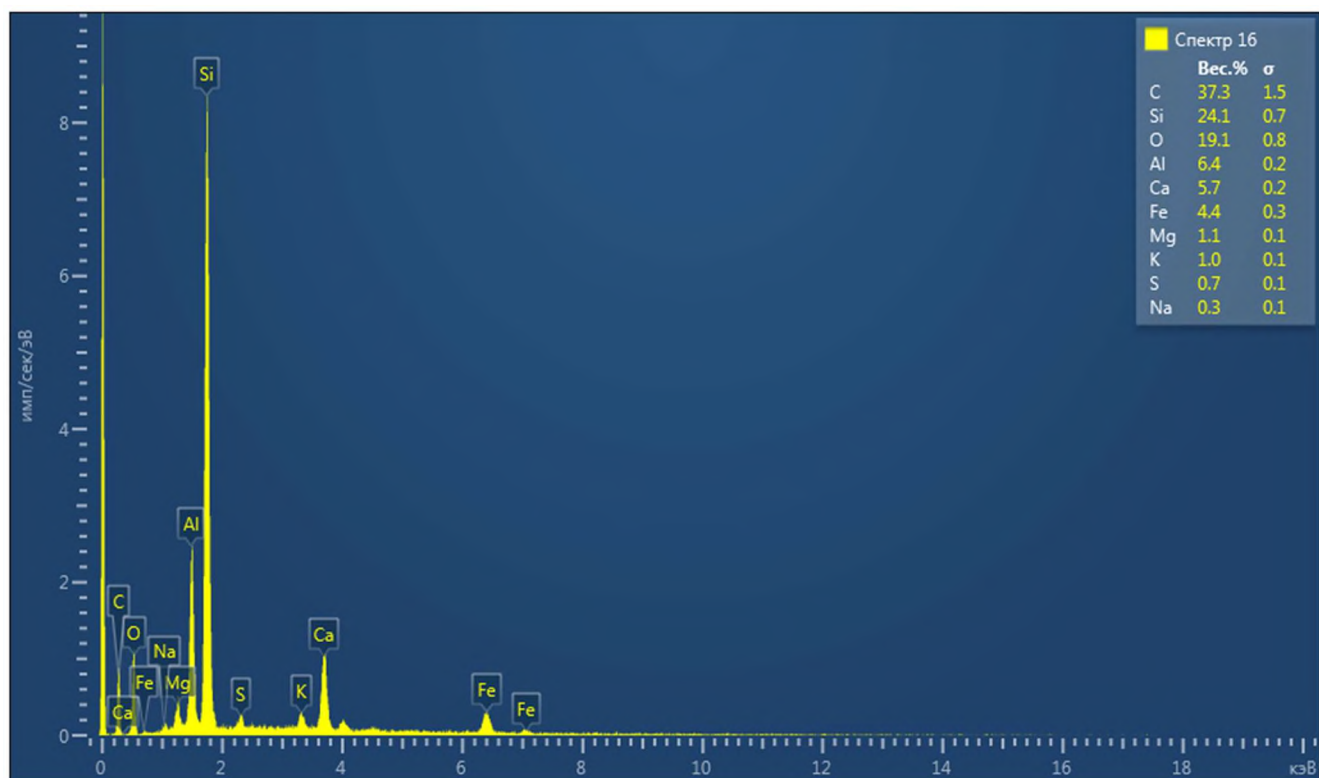


Рисунок А.10 – Массовый спектр 16.

Таблица А.6 – Массовый спектр 16.

Элемент	Тип линии	Вес. %	Сигма Вес. %	Атом. %
C	К серия	37,28	1,55	54,29
O	К серия	19,07	0,80	20,85
Na	К серия	0,34	0,10	0,25
Mg	К серия	1,07	0,11	0,77
Al	К серия	6,41	0,24	4,16
Si	К серия	24,15	0,67	15,04
S	К серия	0,67	0,10	0,37
K	К серия	0,99	0,12	0,44
Ca	К серия	5,66	0,24	2,47
Fe	К серия	4,36	0,29	1,37
Сумма:		100,00		100,00

Приложение Б Характерные осциллограммы начальных частичных разрядов в горючих сланцах

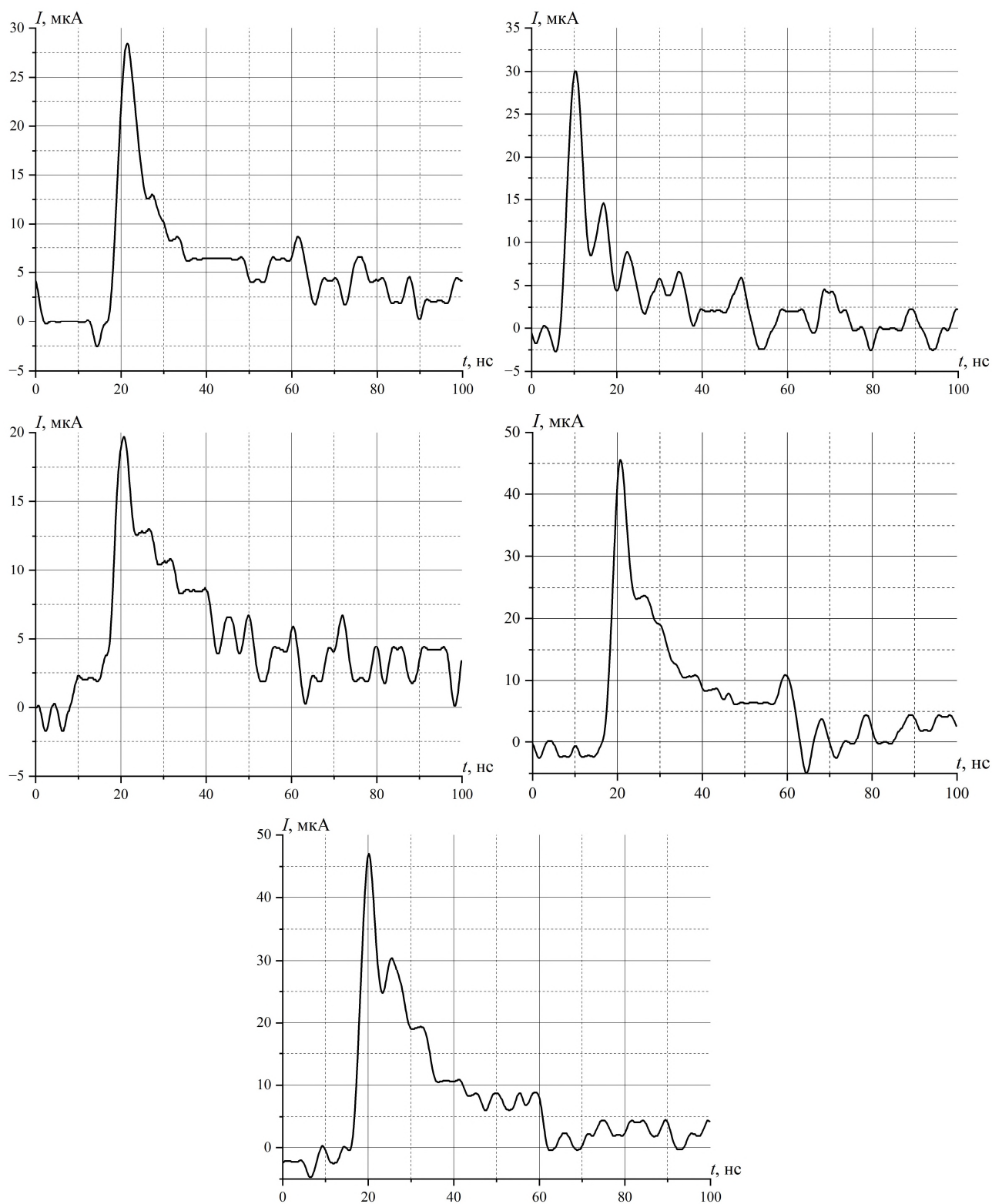


Рисунок Б.1 – Характерные осциллограммы начальных единичных ЧР в горючих сланцах.

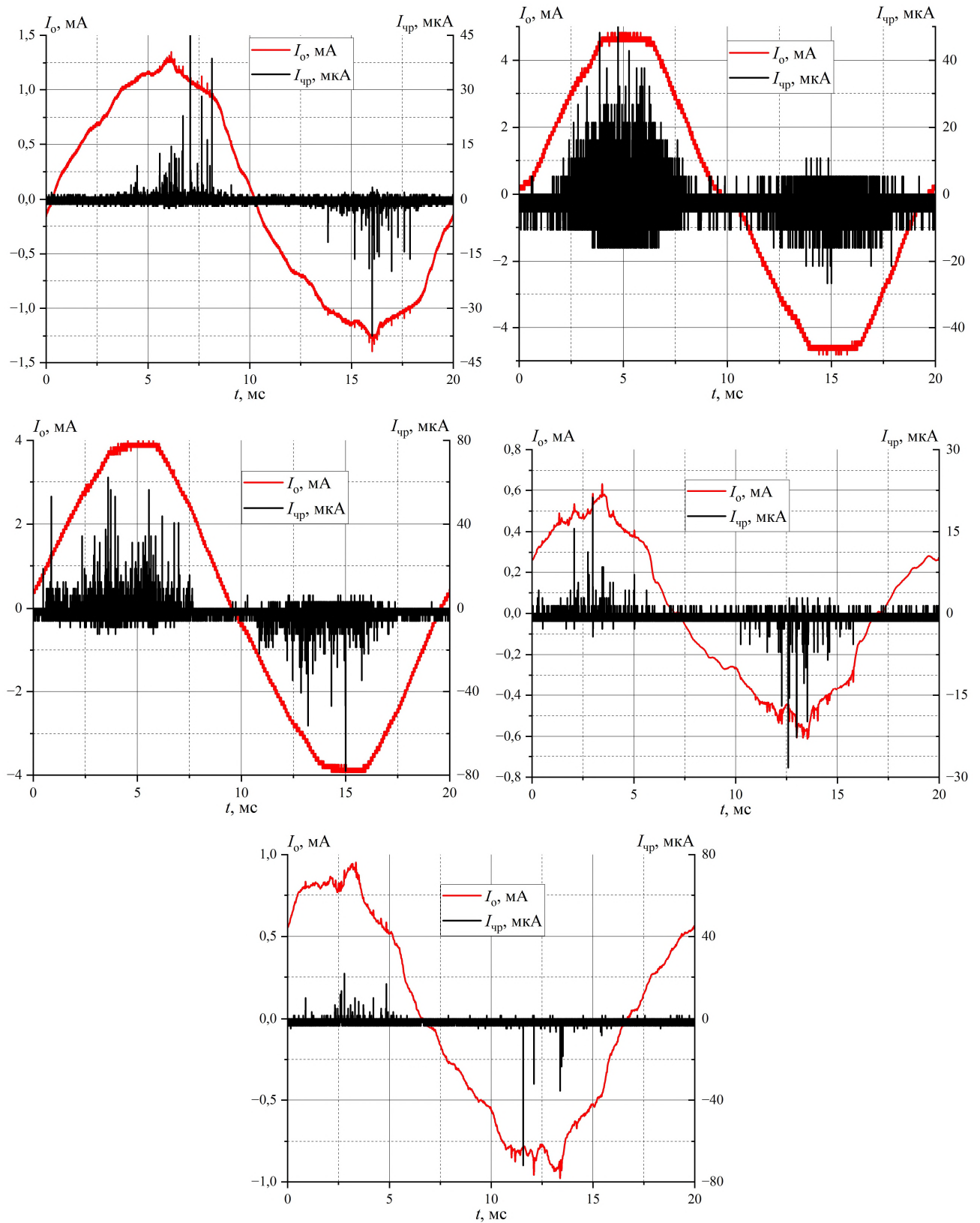
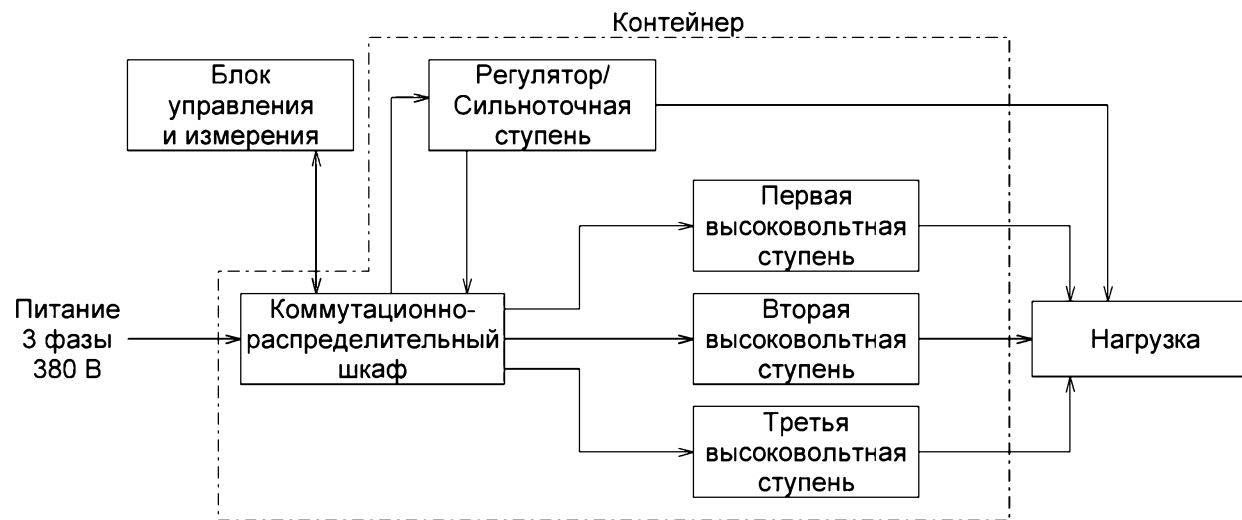
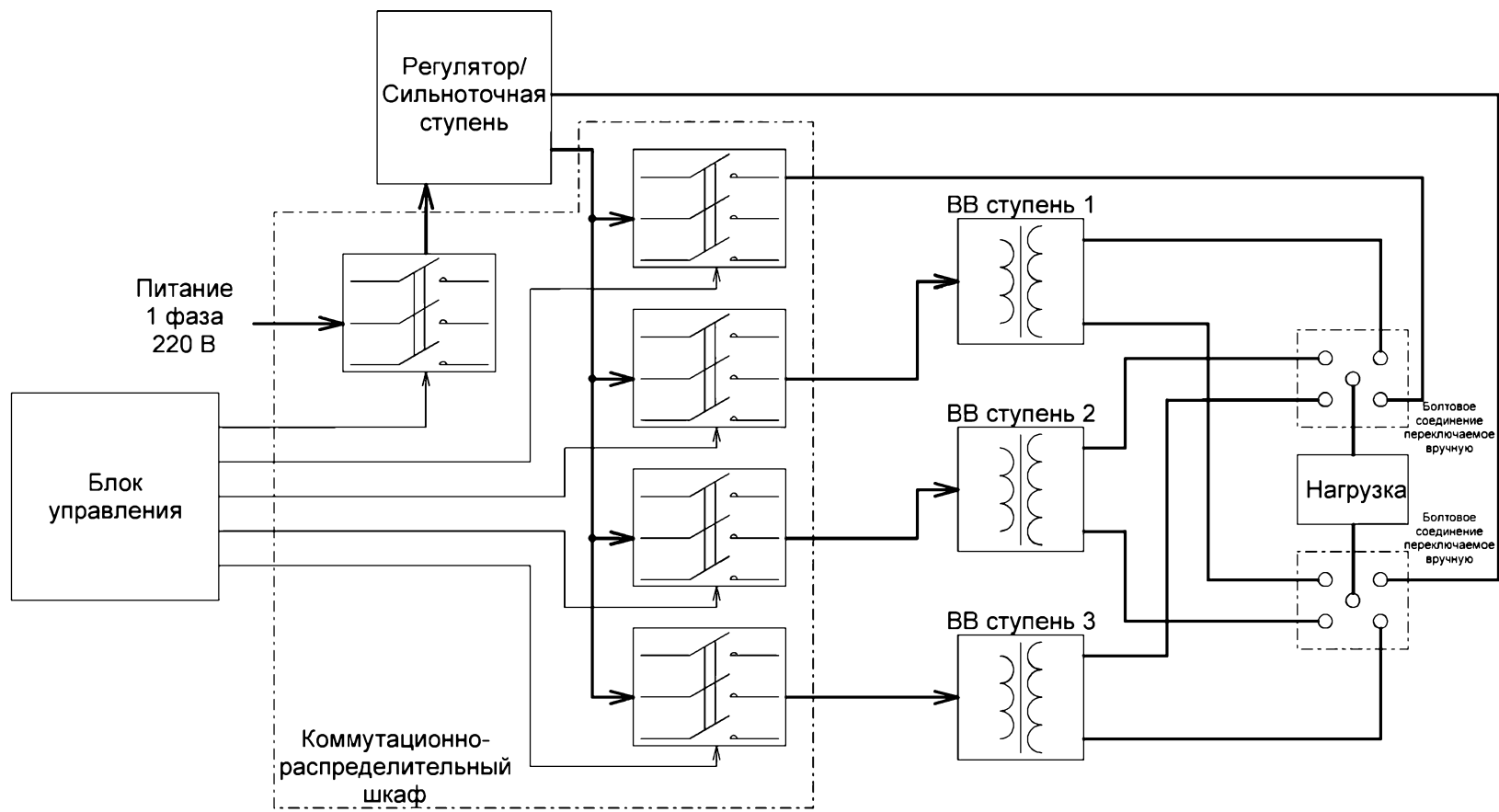


Рисунок Б.2 – Характерные осциллограммы начальных ЧР в горючих сланцах при развёртке экрана осциллографа в один период промышленной частоты.

**Приложение В Эскизы схем, разработанных в рамках модернизации полевой
установки**

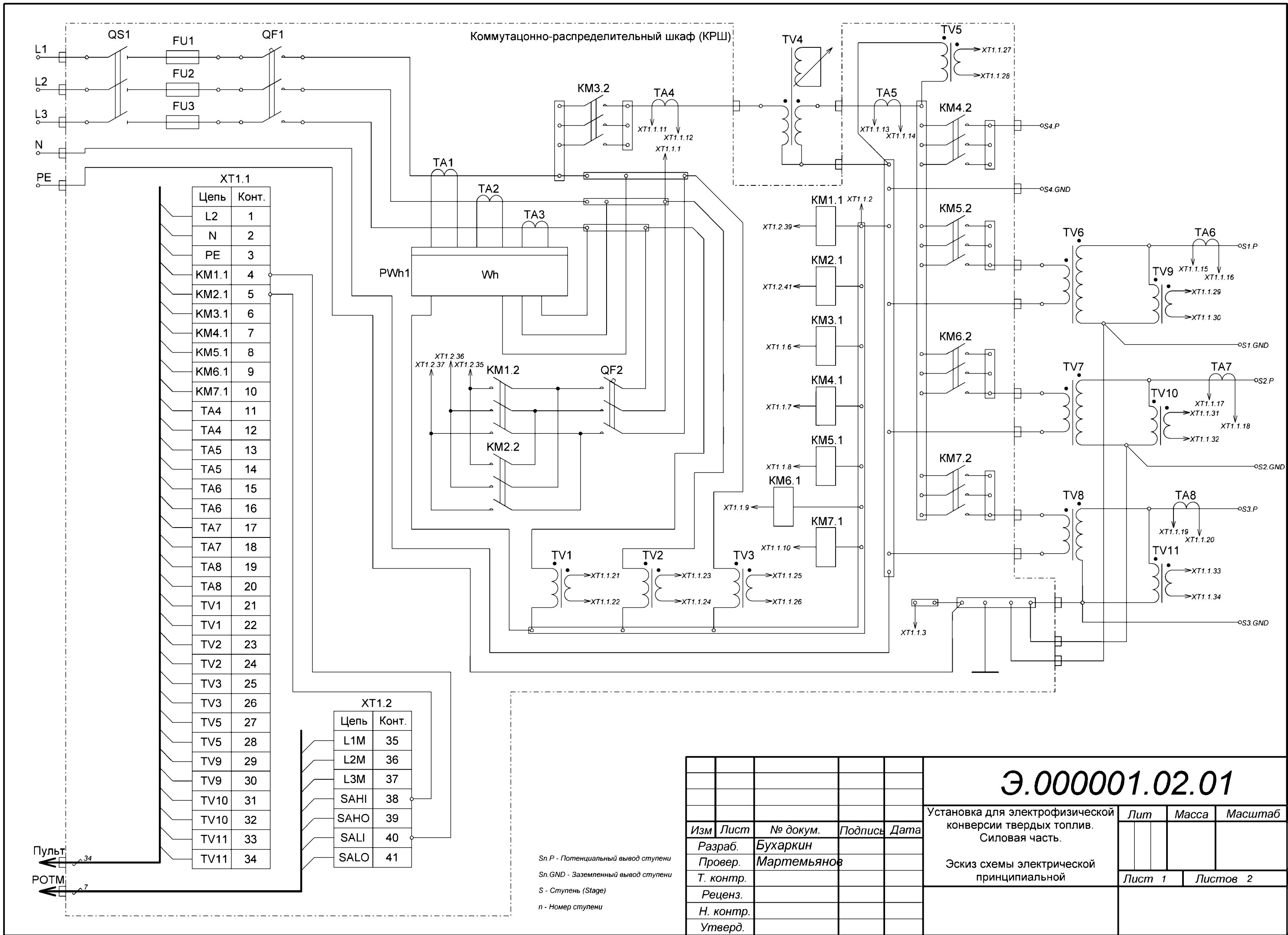


					Э.0000001.00.01						
					Установка для электрофизической конверсии твердых топлив.	Лит.		Масса		Масшт.	
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Эскиз схемы электрической структурной						
Разраб.	Бухаркин										
Пров.	Мартемьянов										
Т.контр.						Лист 1		Листов 1			
Н.контр.											
Утв.											



— Вспомогательные цепи
— Силовые цепи

					Э.000001.01.01							
					Установка для электрофизической конверсии твердых топлив. Эскиз схемы электрической функциональной	Лит.			Масса		Масшт.	
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата								
Разраб.	Бухаркин											
Пров.	Мартемьянов											
Т.контр.												
						Лист 1			Листов 1			
Н.контр.												
Утв.												



Коммутационно-распределительный шкаф (КРШ)

ХТ1.1	
Конт.	Цепь
1	L2
2	N
3	PE
4	KM1.1
5	KM2.1
6	KM3.1
7	KM4.1
8	KM5.1
9	KM6.1
10	KM7.1
11	TA4
12	TA4
13	TA5
14	TA5
15	TA6
16	TA6
17	TA7
18	TA7
19	TA8
20	TA8
21	TV1
22	TV1
23	TV2
24	TV2
25	TV3
26	TV3
27	TV5
28	TV5
29	TV9
30	TV9
31	TV10
32	TV10
33	TV11
34	TV11

ХТ1.2	
Конт.	Цепь
35	L1M
36	L2M
37	L3M
38	SAHI
39	SAHO
40	SALI
41	SALO

Пульт

ХТ2	
Цепь	Конт.
L2	1
N	2
PE	3
KM1.1	4
KM2.1	5
KM3.1	6
KM4.1	7
KM5.1	8
KM6.1	9
KM7.1	10
TA4	11
TA4	12
TA5	13
TA5	14
TA6	15
TA6	16
TA7	17
TA7	18
TA8	19
TA8	20
TV1	21
TV1	22
TV2	23
TV2	24
TV3	25
TV3	26
TV5	27
TV5	28
TV9	29
TV9	30
TV10	31
TV10	32
TV11	33
TV11	34

ПОТМ

Цепь	Конт.
L1M	35
L2M	36
L3M	37
SAHI	38
SAHO	39
SALI	40
SALO	41

Э.000001.03.01

					Установка для электрофизической конверсии твердых топлив.		
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.		Бухаркин			Эскиз схемы электрической соединений		
Провер.		Мартемьянов					
Т. контр.							
Реценз.							
Н. контр.							
Утверд.							

Поз. обознач.	Наименование	Кол.	Примечание
	<u>Автоматические выключатели</u>		
QF1	BA88-40 3P 630A 35кА IEK	1	
QF2	BA47-29 3P 2A 4,5кА D IEK	1	
QF3	BA47-29 3P 6A 4,5кА D IEK	1	
	<u>Амперметры</u>		
PA1, PA2	ЭА2258М, 600 А, 600/5, кл. 1,5	2	
PA3	ЭА2258М-10, 1 А, кл. 1,5	1	
PA4	ЭА2258М, 10 А, 10/5, кл. 1,5	1	
PA5	ЭА2258М, 75 А, 75/5, кл. 1,5	1	
	<u>Вольтметры</u>		
PV1... PV5	ЭВ2259М, 500 В, 500/100, кл. 1,5	5	
PV6	ЭВ2259М, 100 кВ, 100000/100, кл. 1,5	1	
PV7	ЭВ2259М, 15 кВ, 15000/100, кл. 1,5	1	
PV8	ЭВ2259М, 2 кВ, 2000/100, кл. 1,5	1	
	<u>Выключатель-разъединитель</u>		
QS1	ВР32И-39В71250 630А IEK	1	
	<u>Выключатель кнопочный</u>		
SB1	LAY5-BS542 "Грибок" аварийная поворотная с фиксацией IEK	1	
SB2, SB3	LAY5-BA21 без подсветки черная 1з 1о IEK	2	
	<u>Индикаторы световые</u>		
HL1, HL2	LAY5-BU63 d=22мм зеленый IEK	2	
HL3, HL4	LAY5-BU65 d=22мм желтый IEK	2	
HL5	LAY5-BU64 d=22мм красный IEK	1	

					Э.0000001.02.02					
					Установка для электрофизической конверсии твердых топлив.	Лит			Масса	Масштаб
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						
Разраб.		Бухаркин			Перечень элементов					
Провер.		Мартемьянов								
Т. контр.						Лист 1			Листов 3	
Реценз.										
Н. контр.										
Утверд.										

Поз. обознач.	Наименование	Кол.	Примечание
HL6, HL7	AL-22TE сигнальная d=22мм белый неон/240В цилиндр IEK	2	
	<u>Контакторы</u>		
KM1, KM2	КМИ-10910 9А 230В/АС3 1НО IEK	2	
KM3...KM7	КТИ-7630 630А 230В/АС3 IEK	5	
	<u>Переключатели</u>		
SA1...SA5	LAY5-BD25 на 2 положения "I-O" стандартная ручка IEK	5	
	<u>Предохранители</u>		
FU1...FU3	ПВР 630А IEK	1	
	<u>Реле промежуточные</u>		
K1...K6	РЭК77/4(LY4) 10А 220В АС IEK	6	
	<u>Соединение разборное</u>		
XT1.1	ЗНИ-6мм2 (JXB50А) серый IEK	1	
XT1.2	ЗНИ-6мм2 (JXB50А) синий IEK	1	
XT1.3	ЗНИ-6PEN 6мм2 (JXB-земля) IEK	1	
XT1.4... ...XT1.41	ЗНИ-6мм2 (JXB50А) серый IEK	38	
XT2.1	ЗНИ-6мм2 (JXB50А) серый IEK	1	
XT2.2	ЗНИ-6мм2 (JXB50А) синий IEK	1	
XT2.3	ЗНИ-6PEN 6мм2 (JXB-земля) IEK	1	
XT2.4... ...XT2.34	ЗНИ-6мм2 (JXB50А) серый IEK	31	
	<u>Счетчик электроэнергии</u>		
PWh1	STAR 302/1 C4-5(7,5)M T IEK	1	

					Э.000001.02.02						
					Установка для электрофизической конверсии твердых топлив.	Лит			Масса	Масштаб	
Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата							
Разраб.		Бухаркин									
Провер.		Мартемьянов									
Т. контр.											
Реценз.					Перечень элементов	Лист 2			Листов 3		
Н. контр.											
Утверд.											

Приложение Г Патенты, полученные в результате выполненной работы

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ  ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ		(19) RU (11) 2 521 255 (13) C1 (51) МПК <i>E21B 43/295</i> (2006.01)	RU 2 521 255 C1
(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ			
(21)(22) Заявка: 2012152881/03, 10.12.2012 (24) Дата начала отсчета срока действия патента: 10.12.2012 Приоритет(ы): (22) Дата подачи заявки: 10.12.2012 (45) Опубликовано: 27.06.2014 Бюл. № 18 (56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2349745 C2, 20.03.2009. RU 2102587 C1, 20.01.1998. RU 2215872 C2, 10.11.2003. US 2010/0078169 A1, 01.04.2010 Адрес для переписки: 634050, г. Томск, пр-кт Ленина, д. 30, ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, отдел правовой охраны результатов интеллектуальной деятельности		(72) Автор(ы): Лопатин Владимир Васильевич (RU), Мартемьянов Сергей Михайлович (RU), Бухаркин Андрей Андреевич (RU) (73) Патентообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" (RU)	
(54) СПОСОБ ПОДЗЕМНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ (57) Реферат: Изобретение относится к горному делу и может быть применено для получения газообразного энергоносителя из угля или сланца на месте залегания. Способ включает бурение скважин с поверхности земли в обрабатываемый интервал в подземном пласте, размещение в скважинах электродов, приложение напряжения к электродам, пропускание электрического тока и нагрев пласта за счет джоулева тепла. К электродам прикладывают напряжение,		достаточное для возникновения частичных разрядов и триннга до образования канала электротеплового пробоя в пласте, о моменте образования которого судят по снижению сопротивления межэлектродного пространства, затем пропускают ток через канал электротеплового пробоя в пласте. Технический результат заключается в снижении трудоемкости способа и экономических издержек при подготовке газификации. 1 ил.	

Стр.: 1

Рисунок Г.1 – Сканированный патент на изобретение.

Патент на полезную модель Республики Казахстан:

Патент Республики Казахстан на полезную модель № 4737. Зарегистрировано в Государственном реестре 27.02.2020. Способ подземной газификации угля электрическим разрядом. Авторы: Ермагамбет Б.Т., Мартемьянов С.М., Касенова Ж.М., Бухаркин А.А., Нургалиев Н.У., Казанкапова М.К.

УТВЕРЖДАЮ

Технический директор-главный инженер

ТОО «Богатырь Комир»

С.Г.Усик

« 30 » 10 2020г.

**Акт внедрения**

**технологии подземной газификации угля путем электронагрева угля
пласта 3 Экибастузского каменноугольного месторождения в границах
разреза «Богатырь» ТОО «Богатырь Комир».**

В период с 27 августа по 18 сентября 2020 года ТОО «Институтом химии угля и технологии» были проведены полевые испытания по технологии внутрипластовой конверсии угольного пласта 3 путем электронагрева на территории разреза «Богатырь» ТОО «Богатырь Комир».

Результаты испытаний:

Был проведен электронагрев двух участков угольного пласта (на горизонте -85м) площадью 20м² каждый. В центре каждого участка определены два места под скважины глубиной 0,5 и 1,0 метр, расположенные на расстоянии 1,0 метра друг от друга.

Были сняты показания приборов по электрофизическим показателям: сила тока, импульсы тока, величина напряжения, снимки прогрева участка тепловизором.

Соответствующее необходимое регулирование подачи тока и напряжения осуществлялось через пульт управления установки.

Продукты, полученные в результате испытаний: синтез-газ, полукокс, угольная смола.

С помощью переносного газоанализатора были определен состав синтез-газа: H_2 – 73,2%, CO – 13,3%, CH_4 – 10,5%, CO_2 – 2,1%.

Полевые испытания опытной установки и технологии внутриваптовой конверсии прошли успешно.

В процессе испытаний отработаны различные технологические режимы и условия использования установки.

Заместитель технического директора



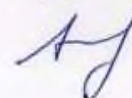
Г.Е. Иргебаев

Главный инженер разреза «Богатырь»



Е.М.Жунусов

Главный геолог разреза «Богатырь»



М.А.Амирханов