

**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**



На правах рукописи

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'А. Бухаркин', is written over the text 'На правах рукописи'.

Бухаркин Андрей Андреевич

**ПОДЗЕМНАЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКАЯ
КОНВЕРСИЯ ИСКОПАЕМЫХ ТВЁРДЫХ ТОПЛИВ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

2.4.4 – Электротехнология и электрофизика

Томск – 2025

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

Научный руководитель:

Ремнёв Геннадий Ефимович

Доктор технических наук, Профессор, Научно-производственная лаборатория "Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий" Инженерной школы новых производственных технологий ФГАОУ ВО НИ ТПУ, Заведующий лабораторией

Официальные оппоненты:

Мурко Василий Иванович

Доктор технических наук, Профессор, Центр инновационных угольных технологий ФГБОУ ВО «СибГИУ», Директор

Лернер Марат Израильевич

Доктор технических наук, Лаборатория физикохимии высокодисперсных материалов ФГБУН ИФПМ СО РАН, Заведующий лабораторией

Защита состоится 29 декабря 2025 г. в 12⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.19 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, 7, корпус 8, аудитория 217.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан ____ 2025 г.

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

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized, flowing script that starts with a large 'I' and ends with a long horizontal stroke.

Ивашутенко Александр Сергеевич

Общая характеристика работы

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. Альтернативные способы генерации электроэнергии пока не способны обеспечить необходимый уровень генерации, к тому же не являются источником химического сырья. В итоге ископаемые твёрдые топлива ещё долгое время будут играть существенную роль в отраслях народного хозяйства. Согласно документам, регламентирующим приоритеты экономического и научно-технического развития РФ, добывающие отрасли будут оставаться актуальными 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. Один из перспективных путей комплексной модернизации технологий разработки ИТТ – подземная переработка твердой органической компоненты породы непосредственно на месте залегания пласта (*in situ* способы). На территориях богатых залежами ископаемых твёрдых топлив, в том числе низкосортных, действуют организации из сектора разработки заинтересованные во внедрении таких технологий на коммерческой основе.

Из множества *in situ* способов разработки месторождений твердых топлив только две технологии прошли все стадии разработки и внедрялись в промышленных масштабах на мировом уровне. Подземная газификация угля (ПГУ) обладает низкой эффективностью вследствие плохой управляемости, низкой калорийности и неуниверсальности конечных продуктов. Гидравлический разрыв пласта (ГРП), применяется, в основном, для глубокозалегающих пластов большой мощности и определённой степени метаморфизма, т.е. качественного, но нерентабельного в связи с глубиной залегания, сырья. ГРП весьма неуниверсальна, при этом нет однозначного ответа на счёт экологической безопасности этой технологии.

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

Весьма существенный вклад в исследования ИТТ, главным образом углей, внёс Агроскин Анатолий Абрамович. Ключевые результаты его исследований, относящиеся к теме диссертации: электрофизические характеристики породы, эффект поляризации в твёрдых топливах под действием напряжения. Также Агроскин описал пробой ИТТ высоким напряжением и предложил использовать это явление для газификации, но подробных исследований этой темы в его основных трудах не приведено.

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

Мартемьяновым Сергеем Михайловичем под руководством Лопатина Владимира Васильевича был обнаружен пробой породы при попытке нагрева ИТТ ВЧ полем высокого напряжения. После чего выдвинута гипотеза о влиянии частичных разрядов на формирование канала пробоя. Получены газообразные продукты конверсии и проанализирован их состав.

В литературе приведено множество данных о влиянии на процесс конверсии ИТТ различных параметров как топлива, так и методики, включая используемый способ. 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 джоулевым теплом в проводящем канале, сформированном при воздействии высокого напряжения с точки зрения электрофизических процессов, их влияния на состав получаемых продуктов и параметры требуемого оборудования.

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 кВт/дм³, оптимальный максимум нарастания мощности 0,8 Вт/дм³мин.
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 полевая установка для электрофизической конверсии ископаемых твёрдых топлив.
3. Даны рекомендации по модернизации опытной полевой 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 полевых условиях на разрезе «Богатырь» (Казахстан) с учётом обеспечения достаточного тока.

Научные положения, выносимые на защиту

1. В ископаемых твёрдых топливах для межэлектродного расстояния до 200 мм при увеличении межэлектродного расстояния в ~4 раза, напряжение возникновения частичных разрядов возрастает на ~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 Вт/дм³мин.

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 соответствии 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.

Аналитическое оборудование: растровый электронный микроскоп LEO1455VP при ускоряющем напряжении 20 кВ детектором отраженных электронов; спектрометр iCAP 6300 Duo, Thermo Scientific (атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой); Agilent 7890 A с колонкой ShinCarbon ST (RESTEK), детектором по теплопроводности и 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, общепризнанных аналитических методик, систематическим характером исследований, непротиворечивостью полученных данных и их согласием с результатами других исследователей и уже известными научными фактами. Также высокой степенью соответствия результатов лабораторных и натурных испытаний.

Апробация работы

Результаты были представлены на всероссийских и международных конференциях: X Международного Российско-Казахстанского Симпозиума «Углекислота 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, разработана методика и выбрано аппаратное оснащение исследования. Синтезировано и реализовано схемотехническое и конструктивное исполнение схемы для измерения частичных разрядов в ископаемых твёрдых топливах при напряжениях промышленной частоты до 50 кВ. Проведены экспериментальные исследования частичных разрядов в ископаемых твёрдых топливах, формирования проводящего канала в породе 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 породы и проведены натурные испытания способа. 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 кандидатской диссертации внедрены в производственный процесс Экибастузского каменноугольного месторождения в границах разреза богатырь ТОО «Богатырь Комир», г. Экибастуз, Казахстан. Использование результатов диссертационной работы подтверждается соответствующим актом внедрения.

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, патенты, акт о внедрении результатов работы, эскизные схемы рекомендованные в рамках модернизации.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность проводимых исследований, поставлена цель и сформулированы задачи, положения, выносимые на защиту, новизна и практическая значимость диссертационной работы.

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 первом разделе описана взаимосвязь между феноменологической моделью электрофизической конверсии и оборудованием, требуемым для её осуществления и исследования. 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. Непосредственное её использование для нагрева затруднено, в связи с весьма малым поперечным сечением. На втором этапе к 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 и дальнейшей карбонизации породы.

Таким образом, сопротивление нагрузки, представляющей собой участок пласта в полевых условиях или фрагмент породы в лабораторных, снижается минимум на 5 порядков. По ряду причин целесообразно разделить нагрузочный диапазон минимум на три поддиапазона, используя отдельный агрегат на каждый.

Во втором разделе приведена аппаратная реализация силовых агрегатов лабораторного комплекса по исследованию электрофизической конверсии ископаемых твёрдых топлив. В основе лежит использование трёх источников напряжения, подключаемых поочерёдно по мере снижения сопротивления образца. Первый – ИОМ 100/100, второй – несерийный повышающий трансформатор 10 кВ, третий – РОТМ 100/05, он же используется как регулятор.

Максимальное обеспечиваемое напряжение – 100 кВ. Максимальный обеспечиваемый ток – 264 А.

Для создания безокислительной среды, имитирующей недостаток кислорода в пласте, использовалась герметичная камера объёмом ~60 л с форвакуумным насосом. Экспериментальный объём заполнялся азотом для имитации давления флюидов в пласте.

В третьем разделе описано диагностическое оборудование, используемое в процессе исследования. Температура образца измерялась вольфрам-рениевыми термопарами ВР5/ВР20-А-1. Для измерения характеристик частичных разрядов (ЧР) применялась схема измерения тока через образец, т.к. она обладает лучшей чувствительностью. Собственные ЧР в схеме не обнаружены при напряжении до 5 кВ. Измерительный шунт был выполнен в коаксиальном исполнении для снижения влияния паразитных параметров и внешних помех на измерения.

В четвёртом разделе приведён расчёт совокупной нагрузочной характеристики силовых агрегатов лабораторного комплекса (рис. 2). Реальная характеристика комплекса перекрывает весь диапазон токов и напряжений при заданном эталоне 3 кВт. Исключением является небольшая область в точке перехода к непосредственно нагреву и дальнейшей конверсии. На практике это приводит к незначительному увеличению времени, необходимого для формирования устойчивого канала.

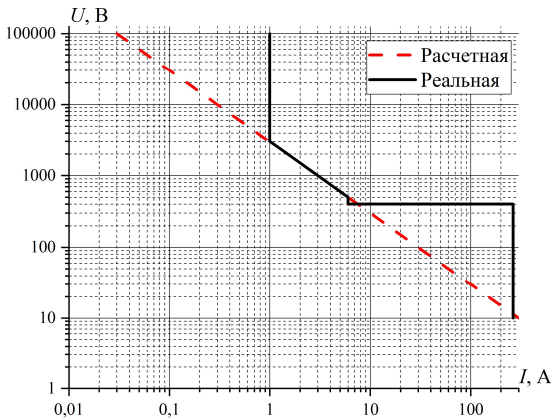


Рисунок 2 – Нагрузочная характеристика: пунктир – условный теоретический эталон (3 кВт), сплошная – реальная характеристика лабораторного комплекса.

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 первом разделе проанализированы микроскопическое исследование горючих сланцев месторождения Хуадянь (Китай) с помощью растрового электронного микроскопа *LEO1455VP* при ускоряющем напряжении 20 кВ детектором отраженных электронов. На рисунке 3 представлена общая морфология поверхности с указанием включений.

На микрофотографии (рис. 4) указаны диагностированные спектры некоторых включений, а в таблице 1 элементный состав в соответствии с этими спектрами.

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 и ориентацией пробоя вдоль слоёв.

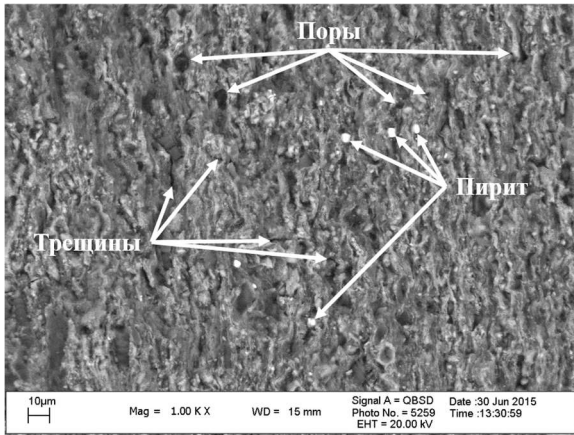


Рисунок 3 –
Микрофотография ГС
Хуадяньского
месторождения.
Обозначены микропоры,
микротрещины и
минеральные
кристаллические включения
пирита, основной фон
органическая матрица.

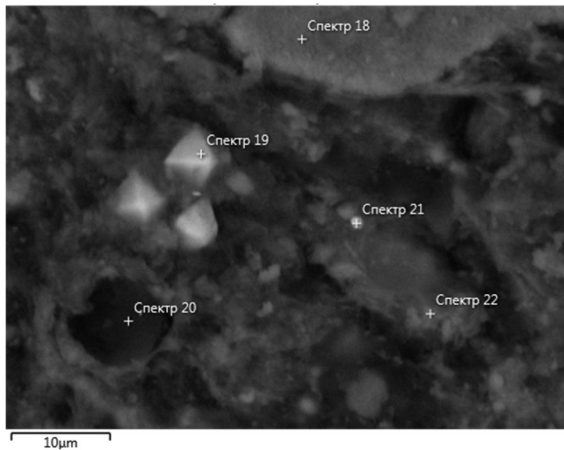


Рисунок 4 –
Микрофотография ГС
Хуадяньского
месторождения, с
обозначением
диагностированных
спектров.

Таблица 1 – Спектры, указанные на рисунке 4.

Элемент		C	O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe	Mo	Сумма
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

Во втором разделе представлены аналитические исследования количественного элементного и фазового состава горючих сланцев месторождения Хуадянь (Китай). Применялась атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре *iCAP 6300 Duo*, *Thermo Scientific*. Наиболее значащие измеренные концентрации элементов, входящих в основной состав слагающих пород представлены в таблице 2.

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. Гетероатомные соединения, гидроксильные и карбоксильные группы органической составляющей ГС при весьма тяжелых и длинных нелинейных молекулах может приводить к возникновению 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. Также стоит отметить динамически меняющиеся локальные и совокупные свойства породы при протекании через неё тока и локальном нагреве.

Таблица 2 – Концентрация элементов в горючих сланцах Хуадяньского месторождения.

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
Si	60700	132900	110260	104060	104560	106293,333
Ca	166600	51620	49140	36750	39810	41900
Al	7790	38610	26790	16700	19420	20970
Fe*	11480	17620	21980	21890	21760	10938,333
K	1025	8210	6156	5567	6066	5929,667
Mg	91190	8310	4904	4941	5426	5090,333
Na	931,7	4147	3692	3394	3588	3558
Ti	380,3	1675	1715	1688	1712	1705

В третьем разделе описаны экспериментальные исследования по инициации частичных разрядов в ископаемых твёрдых топливах, на примере горючих сланцев месторождения Хуадянь (Китай). Также приведён анализ полученных результатов. Напряжение и напряжённость возникновения ЧР в ИТТ имеют аномально низкие значения. На рисунке 5 приведены характерные осциллограммы начальных ЧР. В таблице 3 приведены данные полученный в двух сериях усреднённые по каждой, в первой серии – 10 образцов, во второй – 8.

Из таблицы 3 видна слабая зависимость напряжения и напряженности возникновения ЧР от напряжения, приложенного к образцу, и межэлектродного расстояния, и, соответственно, средней напряженности между электродами. Так увеличение межэлектродного расстояния в ~4 раза привело к увеличению

напряжения возникновения на $\sim 30\%$ и снижению напряженности возникновения в ~ 3 раза. При этом величина кажущегося заряда практически не изменилась.

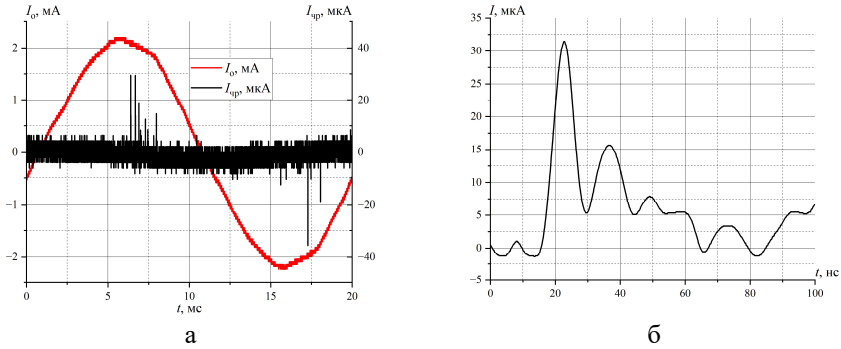


Рисунок 5 – Осциллограммы токов: а – суммарный ток через образец (I_0) и то же с отфильтрованной НЧ составляющей (I_{ch}), б – ток единичного ЧР.

Таблица 3 – Данные экспериментов по инициации ЧР.

Серия 1				Серия 2			
$U_{чр}$, В	L , мм	$E_{чр}$, В/мм	q_0 , пКл	$U_{чр}$, В	L , мм	$E_{чр}$, В/мм	q_0 , пКл
580^{+120}_{-80}	50 ± 5	$11,6^{+2,8}_{-1,8}$	$0,5^{+0,42}_{-0,26}$	794^{+66}_{-170}	200 ± 10	$3,9^{+0,3}_{-0,8}$	$11,6^{+0,37}_{-0,32}$

При воздействии электрического поля в ГС происходит накопление локального заряда из-за синергии различных эффектов связанных с особенностями строения и состава породы. В связи с чем, напряжение и напряженность возникновения ЧР в горючих сланцах имеют весьма низкие значения. При межэлектродном расстоянии ~ 50 мм и ~ 200 мм напряженность возникновения ЧР 11,6 В/мм и 3,9 В/мм соответственно. Аналогичные параметры даже в гетерогенной и состаренной изоляции минимум на порядок выше.

Основные механизмы искажения поля:

- Эффект Максвелла-Вагнера, заключающий в накоплении носителей заряда в области раздела разнородных фаз
- Распределение напряжения в соответствии с эквивалентной емкостью материалов составляющих породу, зависящей от их диэлектрической проницаемости
- Увеличение локальной напряженности на острых структурах
- Распределение напряжения по объему породы в соответствии с проводимостью различных областей.

В четвертом разделе приведены результаты экспериментов по пробое горючих сланцев. Описан процесс карбонизации при воздействии температуры плазмы ЧР и тока протекающего в канале пробоя. На рисунке 6 показаны зависимости напряжения и средней напряженности пробоя горючих сланцев и бурых углей от межэлектродного расстояния. На рисунке 7 приведена фотография образца после пробоя и частичной конверсии.

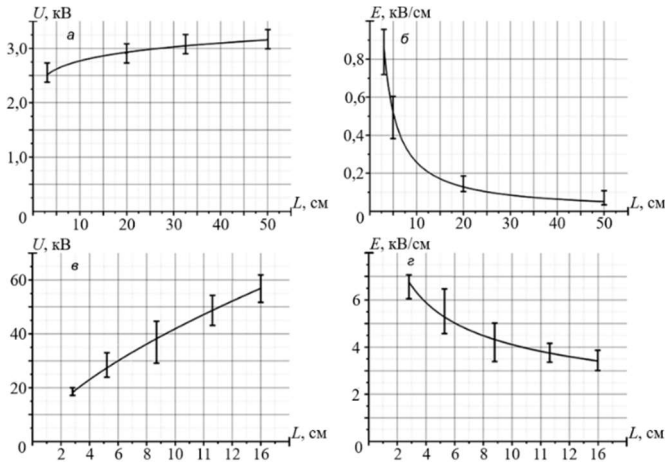


Рисунок 6 –
Зависимость
напряжения (а, в) и
средней
напряженности (б, г)
пробоя горючих
сланцев (а, б) и
бурых углей (в, г) от
межэлектродного
расстояния.

Учитывая слабое увеличение напряжения и крайне низкую напряжённость пробоя при расстояниях свыше 30 см, можно предполагать, что пробой расстояний в несколько метров потребует технически разумного уровня напряжения.

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 объёме породы.



Рисунок 7 – Фотография образца после
пробоя и частичной конверсии.

В пятом разделе представлены экспериментальные исследования качественной зависимости продуктов электрофизической конверсии от вводимой в породу мощности.

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.

Состав газообразных продуктов, определённых хроматографом Agilent 7890A: H_2 – 51%; CO – 31%; CH_4 – 11%; CO_2 – 7%.

Качественный состав жидких продуктов, определённых хроматографом Agilent 7890A разделённых на 4 фракции.

Фракция предельных и непредельных углеводородов представлена алканами и соответствующими им алкенами от C10 до C21. 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.

Низкоскоростная конверсия.

Скорость нарастания температуры поддерживалась регулировкой мощности, путём изменения прикладываемого напряжения. Динамика изменения тока, напряжения, мощности и температуры представлены на рисунке 8.

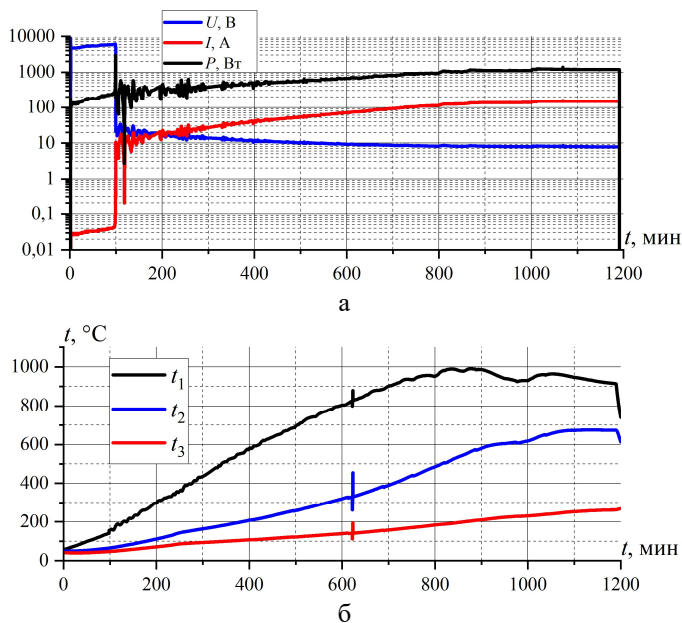


Рисунок 8 – Динамика тока, напряжения, мощности (а) и температуры (б) в процессе конверсии. t_1, t_2, t_3 – термопары, t_1 расположена в центре межэлектродной прямой, t_2, t_3 – с равным шагом ~ 25 мм от t_1 перпендикулярно межэлектродной прямой.

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. Более качественные продукты образуются при медленном нагреве.

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 первом разделе описан испытательный полигон на разрезе «Богатырь» (Казахстан). Расстояние между скважинами – 1,5 м, диаметр – 300 мм, глубина – 1,5 м. Общий вид подготовленного полигона представлен на рисунке 9.



Рисунок 9 – Общий вид испытательного полигона.

Во втором разделе описана опытная полевая установка для испытания электрофизической конверсии ископаемых твёрдых топлив. Реализация аналогична лабораторной установке. Три источника, подключаемые поочерёдно: ИОМ 100/100, ОМ 25/10, РОТМ 100/05. На рисунке 11 приведён диапазон обеспечиваемых мощностей.

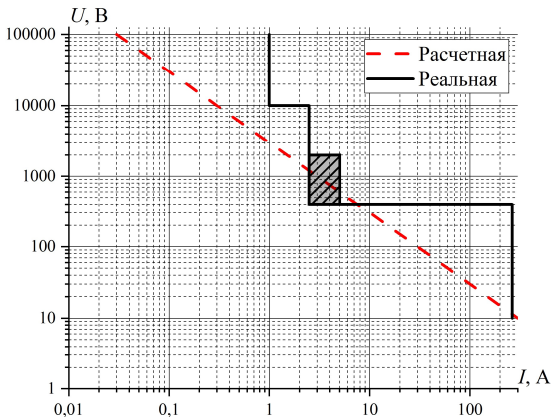


Рисунок 11 – Нагрузочная характеристика: пунктир – непрерывный диапазон 3 кВт, сплошная – реальная характеристика опытной полевой установки, заштрихованная область – диапазон двукратной перегрузки ОМ 25/10 по току.

В третьем разделе приведены результаты полевых испытаний и их анализ. На рисунке 11 представлена динамика основных электрофизических параметров во время испытаний.

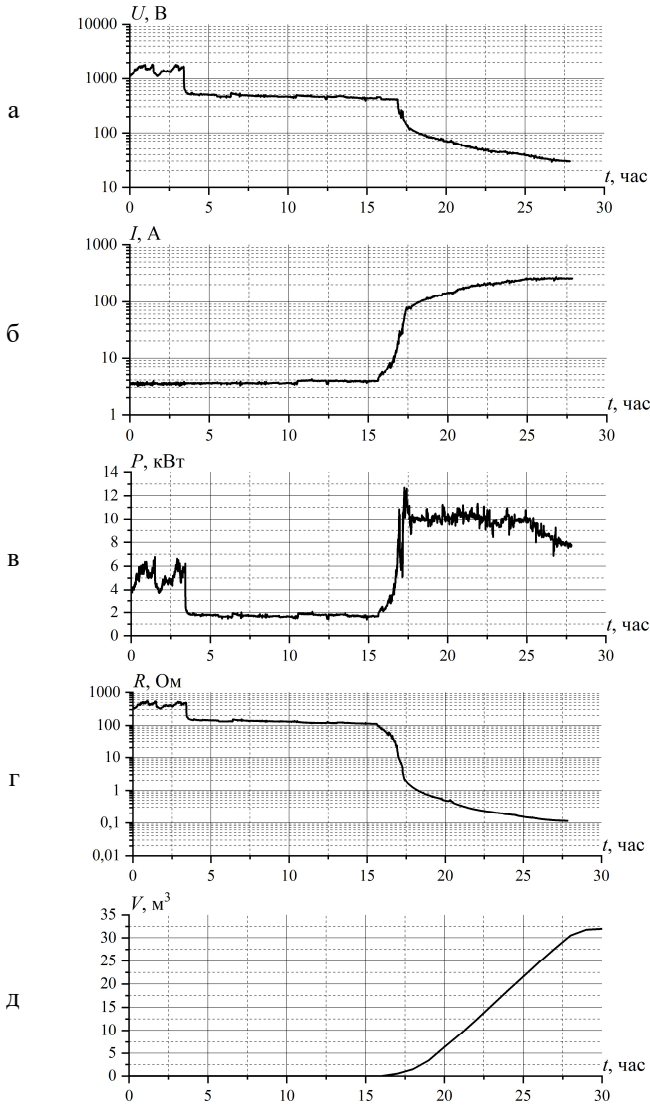


Рисунок 11 – Динамика основных электрофизических параметров в процессе полевых испытаний. а – напряжение, б – ток, в – мощность, г – сопротивление, д – выход газа.

Явно наблюдаются различные стадии процесса. В первые 3,5 часа сопротивления фрагмента угольного пласта колебался около значения 400 Ом. От 3,5 до 16 часов происходило постепенное снижение сопротивления породы вследствие джоулева нагрева. После 16 часов начался продуктивный нагрев. Через 25 часов сопротивление экспериментального фрагмента пласта достигло 0,16 Ом, испытания завершились. Максимальное требуемое начальное напряжение составило 2 кВ. Осуществлён полный цикл конверсии. Состав газа полученного во время испытаний: CO – 22,29 %, CO₂ – 4,49 %, CH₄ – 5,12 %, H₂ – 73,20 %, N₂ – 10,11 %. КПД установки составил 74 %.

В четвёртом разделе представлены результаты испытаний с большим расстоянием между скважинами и их анализ. Динамика электрических параметров представлена на рисунке 12.

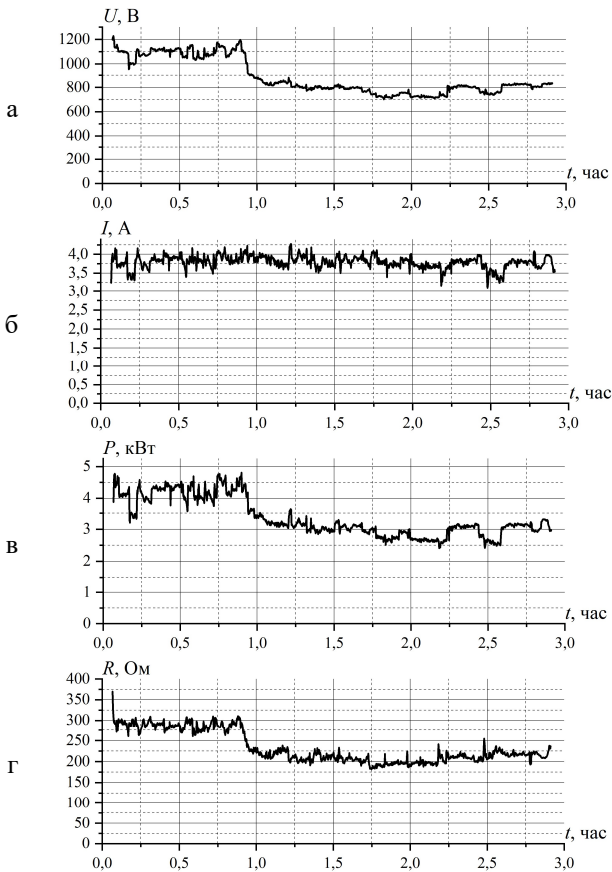


Рисунок 12 – Динамика электрических параметров при подводе напряжения между участками с межэлектродным расстоянием 5,8 м. а – напряжение, б – ток, в – мощность, г – сопротивление.

Напряжение прикладывалось к скважинам двух испытательных площадок, т.е. между площадками, расстояние между электродами составило 5,8 м.

Исходное сопротивление фрагмента угольного пласта в этом эксперименте составило 300 Ом. Спустя 3 часа, при остановке пробного пуска оно снизилось до 200 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.

На основании проведённых экспериментов можно сделать вывод о возможности масштабирования электрофизической конверсии ИТТ на технологически целесообразные (от 10 м) расстояния между скважинами. Основные рекомендации: замена ОМ 25/10 на ТСЛ-100-35/0,4 и ТСЛ-100-6/0,4 в обратном включении и с однофазной ошиновкой, дополнительное оснащение ОСЭ 100-380/25 для увеличения обеспечиваемого тока и, как следствие, степени конверсии породы.

В пятом разделе приведена опосредованная оценка эффективности и перспектив использования электрофизической конверсии. Несмотря на неблагоприятные условия испытаний, рассматриваемая технология относительно эффективна, сопоставима с ПГУ. Позволяет получать газообразные продукты с теплотворной способностью $\sim 10,91$ МДж/м³ и низким содержанием до 15 % балластных продуктов.

В заключении приведены результаты и выводы по диссертационному исследованию.

1. Разработана и сконструирована схема измерения параметров частичных разрядов в ископаемых твёрдых топливах соответствующая рекомендациям международного стандарта IEC 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 ~ 30 %, а напряжённость возникновения снижается в ~ 3 раза.

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

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

б. - Увеличение напряжённости электрического поля на микровключениях с низкой диэлектрической проницаемостью

с. - Увеличение локальной напряженности на структурах типа острий

д. - Неравномерное падение напряжения по объёму 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.

Список основных публикаций по теме диссертационного исследования

Статья 2 кватилия 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 публикации Scopus

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

Публикации в журналах из перечня ВАК

4. Лопатин В.В. Трининг 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. Ермагамбет Б.Т. Технология подземной газификации угля путем электронагрева: Монография / Б.Т. Ермагамбет, 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

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. Ермагамбет, 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 // Углекислота и экология Кузбасса : X Международный Российско-Казахстанский Симпозиум сборник тезисов докладов, Кемерово, 12–13 июля 2021 года. – Кемерово: Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты СоРАН, 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, РК, 27-28 февраля 2020 года. – Нур-Султан: NURIS, 2020. – Т. 1. – С. 90-94.

12. 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.

13. Иванов А.А. Состав продуктов термоокислительного превращения органического вещества горючих сланцев при электрофизическом нагреве / А.А. Иванов, С.М. Мартемьянов, А.А. Бухаркин, В.В. Савельев, А.К. Головки // 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.

Прочие публикации

14. 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

15. 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