



КАСЕНОВА ЖАНАР МУРАТБЕКОВНА

**ПИРОЛИТИЧЕСКАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ УГЛЕЙ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ КАЗАХСТАНА ПРИ ПОДЗЕМНОМ НАГРЕВЕ**

Специальность: 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Инженерной школе новых производственных технологий (ИШНПТ) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ФГАОУ ВО НИ ТПУ) и в лаборатории термохимических и электрофизических процессов ТОО «Институт химии угля и технологии», г. Астана, Республика Казахстан.

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор, заведующий научно-производственной лабораторией «Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий» отделения инженерной школы новых производственных технологий ИШНПТ НИТПУ
Ремнев Геннадий Ефимович

Официальные оппоненты:

Богомолов Александр Романович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры теплоэнергетики Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово.

Мурко Василий Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры открытых горных работ и электромеханики Сибирского государственного индустриального университета, г. Новокузнецк.

Защита диссертации состоится «12» апреля 2022 г. на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.04 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. пр. Ленина, 43, ауд. 401.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте <http://www.dis.tpu.ru>

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
ДС.ТПУ.04,
кандидат технических наук,
доцент

 **Д.В. Гвоздяков**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Современное состояние мировой угольной промышленности показывает снижение конкурентоспособности угля по сравнению с другими энергоносителями. Как показывает практика, повышение рентабельности угольных предприятий и снижение эколого-экономического ущерба возможно при условии наиболее полного использования потенциала угля, включая надугольные и подугольные месторождения, попутные ресурсы, отходы при их добыче. Одним из путей решения перехода на «зеленую» энергетику является перевод генерирующих электростанций на водородсодержащий газ, получаемый путем газификации угля. Как при наземной, так и подземной газификации углей, ведется процесс неполного сгорания топлива, в результате которого образуется синтез-газ, состоящая из смеси горючих и негорючих компонентов (H_2 , CO , CH_4 , CO_2 , N_2).

Подземная газификация угля (ПГУ) в России насчитывает более чем полувековой период практической и научной разработки. К настоящему времени (несмотря на полное прекращение работ по ПГУ в 1996 г.) разработаны новые конструктивные и технологические решения, защищенные блоком свежих российских патентов. Современная технология ПГУ отличается от ранее освоенной, прежде всего, повышенной управляемостью, существенно меньшим числом эксплуатационных скважин и высокой стабильностью технологического процесса. Это обеспечивает экономическую эффективность разработки угольного месторождения методом ПГУ. В перерасчете на условное топливо газ ПГУ на 25 – 35 % дешевле шахтного угля. Весьма невысокая теплота сгорания газа ПГУ, получаемого при воздушном дутье, ограничивает расстояние его транспортирования. ПГУ с одной стороны, предотвращает экологические ущербы на стадиях добычи, хранения и транспорта угля и, с другой, резко уменьшает выбросы на стадии сжигания газа ПГУ у потребителя (вместо угля).

Технологии внутрипластовой переработки твердых ископаемых топлив в настоящее время привлекают внимание многих исследователей. Имеются значительные предпосылки к созданию разнообразных способов внутрипластовой добычи – за последнее десятилетие получены значительные успехи в технологиях бурения, способах трехмерного геомоделирования, способах химической, тепловой и электрической обработки подземного пласта и прочих прорывных направлениях. Однако инновационные способы разработки месторождений и переработки полезных ископаемых еще не вытеснили традиционные.

Нами впервые в мировой практике для производства горючего газа предлагается подземная конверсия высокосольного угля под воздействием приложенного внешнего высокого напряжения, на электроды, приводящие к триинговому пробое путем пропускания тока через область карбонизации угольного пласта. Расчеты, лабораторные и опытные испытания показывают возможность реализации эффективной технологии подземной конверсии углей, основанной на электронагреве. При нагреве угля его органическая масса подвергается пиролитической декомпозиции и вместе с естественной влагой угля образует жидкие и газообразные горючие компоненты. С помощью разработанной технологии был получен газ с высоким содержанием горючих компонентов (H_2 , CO , CH_4) и низким содержанием балластных компонентов (CO_2 , N_2) в результате полученный синтетический газ имеет высокую теплотворную способность 12-16 МДж/м³. Энергия теплотворной способности получаемого газа превышает затрачиваемую на нагрев энергию в десятки раз.

Реализация подземного нагрева «подземном реакторе», то есть непосредственно на месте залегания пласта, позволит перерабатывать уголь без его извлечения на поверхность, что существенно сократит не только издержки производства, но и самое главное, отсутствуют парниковые выбросы в атмосферу. Таким образом, данная технология соответствует целям устойчивого развития и относится к наилучшим доступным технологиям.

В мировой практике имеются технологии подземной газификации угля (Узбекистан, России), которые используют водяной пар и воздух, которые под давлением загоняются в угольный пласт. Процесс становится не контролируемый, так как протекает процесс сжигания угля в подземном пласте. В результате получают низкокалорийный газ (3-4 МДж/м³) с высоким содержанием балластных газов (CO_2 , N_2).

Таким образом, полученный газ по предлагаемой инновационной технологии имеет в 5 раз выше калорийность, что обеспечивает рентабельность производства и относится к экологически чистой технологии.

Степень разработанности темы исследования

Настоящая работа направлена на создание научно-технических и практических основ технологии подземной конверсии углей газообразные и жидкие продукты. Применение электрофизических методов нагрева имеет перспективы стать основой универсальной технологии подземной конверсии углей. Однако электрофизические свойства твердых топлив изучены слабо. В связи с этим диссертационная работа посвящена исследованию электротеплового нагрева углей и физическому моделированию их подземного нагрева, с целью разработки технологии подземной газификации углей. Проведенные лабораторные исследования на модельном реакторе, а также на угольном пласте показали, что использования нагрева угля через частичные разряды, возникающие под действием приложенного внешнего высокого напряжения, приводит к образованию разрядной плазмы и пиролизу с выделением горючих газов.

Существенный вклад в разработке механизма действия частичного разряда в плазме канала при нагреве сланцев внесли ученые НИ ТПУ: Лопатин В.В, Ремнев Г.Е., Мартемьянов С.М, Юдин А.С., Бухаркин А.А. Процесс приводящие к триинговому пробоем зависит от электрического сопротивления и теплопроводности углей, при протекании его через область карбонизации угольного пласта. При этом также учтена удельная теплоемкость исследуемых углей, при электрическом пробое через частичные разряды. В исследовании удельной теплоемкости и кинетики термической деструкции углей Казахстана, а также в исследовании их электрофизических свойств значительный вклад внесли ученые ТОО «Институт химии угля и технологии»: Ермагамбет Б.Т., Казанкапова М.К., Нургалиев Н.У. и ХМИ им. Абишева: Касенов Б.К., Касенова Ш.Б., Сагинтаева Ж.И., Куанышбеков Е.Е.

Тепловой эффект плазмы приводит к нагреву включений в пласте до некоторой температуры термодеструкции, величина которой зависит от энергии частичных разрядов, мощности и времени электронагрева. В случае с углями напряжение возникновения и зависимость интенсивности от напряжения отражают динамику электрофизических процессов в пласте и могут служить индикаторами начала триинга и электротеплового пробоя характеризующая величину электромагнитного воздействия, при котором электрическое сопротивление межэлектродного участка образца скачкообразно уменьшается в несколько сотен тысяч раз. Причиной этого является возникновение сквозного канала пробоя между электродами, состоящего из разрядной плазмы. Высокая температура плазмы вызывает термодеструкцию и карбонизацию контактирующего с ним угольного вещества, в результате чего сопротивление межэлектродного участка сохраняет свое низкое значение даже после отключения напряжения. Измерение характеристик частичных разрядов и напряжения триингового пробоя необходимо для оценки потенциала применения этих явлений для создания технологии подземного пиролиза. Так, низкая напряженность возникновения ЧР и низкое напряжение триингового пробоя свидетельствуют о возможности произвести пробой на значительном межэлектродном расстоянии при технически реализуемом значении напряжения.

Объектом исследования являются электрофизический способ нагрева углей до температуры термодеструкции.

Предметом исследований является измерение электрофизических свойств углей и физическое моделирование подземного нагрева в камере лабораторной установки, а также проведение полевых испытаний на угольном месторождении Богатырь (Экибастузский бассейн). Образцы углей для исследований отобраны с месторождений Сарыадыр (пласт Надежный и Пятиметровый), Майкубен и Богатырь.

Цель работы

Разработка научно-технических и практических основ инновационной технологии пиролитической декомпозиции углей при подземном нагреве с применением электротеплового воздействия, с целью получения синтез газа с высоким содержанием горючих компонентов, а также побочных продуктов с ценными химическими свойствами.

Для достижения указанной цели решались следующие **задачи:**

1. Экспериментальное исследование теплофизических свойств углей месторождения Сарыадыр пласт (Надежный и Пятиметровый), Майкубен, Богатырь в интервале температур 298,15-473 К и вывод соответствующих уравнений температурной зависимости удельной теплоемкости углей;

2. Экспериментальное исследование кинетики термического разложения углей месторождения Сарыадыр пласт (Надежный и Пятиметровый), Майкубен, Богатырь в диапазоне температур 30-900°C, при скоростях нагрева 3,6,9,12,15°C /мин;

3. Исследование электрофизических свойств углей (ε , σ , $\tan\delta$) от повышения частоты с 10 Гц до 1 МГц и тенденции изменения указанных параметров удельной электропроводности, относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь. от частотной зависимости в указанном диапазоне;

4. Проведение лабораторных исследований по имитации внутрипластового нагрева образцов углей в камере укрупненной установки и определение оптимальных условий и параметров физического моделирования подземного нагрева за счет тока, протекающего в канале пробоя между электродами.

6. Математическое моделирование нагрева подземного пласта и проведение расчетных исследований требуемых технических характеристик опытного оборудования;

7. Разработка технологии и проведение натурных испытаний нагрева угольного пласта и подземной конверсии в газообразные продукты на угольном месторождении Богатырь.

Научная новизна работы

1. На основании полученных экспериментальным путем опорных данных в интервале температур 298,15-473 К выведены уравнения температурной зависимости удельной теплоемкости для исследуемых углей месторождения Сарыадыр пласт (Надежный и Пятиметровый), Майкубен, Богатырь.

2. Определена кинетика термического разложения органической массы угля (ОМУ) при различных скоростях нагрева в диапазоне 3-15 град/мин для углей месторождения Сарыадыр, пласт (Надежный и Пятиметровый), Майкубен, Богатырь и выявлено, что увеличение скорости нагрева приводит к уменьшению степени термохимической деструкции органической массы угля и повышает значения температуры $T_{\max}$ и скорости $v_{\max}$ деструкции, обеспечивающих снижение активационных барьеров процесса.

3. Для исследуемых углей определены частотные зависимости удельной электропроводности, относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь. Высокая величина диэлектрической проницаемости свидетельствует о наличии влаги, электропроводность имеет как электронные, так и ионные компоненты, частотная зависимость тангенса угла потерь имеет возрастающий характер в диапазоне до 1 МГц. Исследование электрофизических свойств и характеристик, а также электротеплового нагрева в образцах углей Сарыадыр, пласт (Надежный и Пятиметровый), Майкубен, Богатырь показывают, что угли относятся к слабопроводящим материалам гетерофазного строения с выраженной поляризационной способностью.

4. Проведены экспериментальные работы по моделированию подземного нагрева исследуемых углей месторождения Сарыадыр, пласт (Надежный и Пятиметровый), Майкубен, Богатырь и конверсии угля в газообразные продукты по следующей схеме: электротепловой триинг → электротепловой пробой → электронагрев → пиролиз → газ. В результате для исследуемых углей был получен синтез газ с высоким содержанием горючих компонентов: H_2 – 64-75%, CO – 9,9-21,35%, CH_4 – 4,81-10,8% и высокой теплотворной способностью – 12-16 МДж/м³.

5. Проведено математическое моделирование подземного нагрева углей током в канале электротеплового пробоя. Результаты расчетов показывают возможность достижения температуры пиролиза в окрестности электродов в пределах 10 часов, при мощности нагрева 3 киловатт и межэлектродном расстоянии 0,5м.

6. Осуществлена апробация технологии и разработана методика проведения электротеплового нагрева в полевых условиях на угольном месторождении на разрезе Богатырь (Экибастузский бассейн). Проведенные полевые испытания и расчетные и экспериментальные исследования показывают возможность электропробоя и последующего нагрева при

межэлектродных расстояниях от 0,5 м до 10 м метров в пиролизный газ с высоким содержанием горючих компонентов.

Теоретическая значимость работы заключается в изучении механизма возникновения частичных разрядов в угольных включениях под действием приложенного внешнего высокого напряжения. В момент возникновения частичного разряда в пробиваемом включении горит разрядная плазма, тепловой эффект плазмы приводит к нагреву угля до некоторой температуры, величина которой зависит от энергии ЧР. При повышении приложенного внешнего напряжения энергия ЧР также возрастает. Для углеродсодержащих материалов действие критических ЧР приводит к карбонизации (обугливанию) вещества, результатом чего становится понижение электрического сопротивления.

Практическая значимость работы

Полученные в ходе выполнения диссертационной работы результаты лабораторных исследований, математического моделирования и испытаний по физическому моделированию подземного нагрева для исследуемых углей месторождения Сарыадыр, пласт (Надежный и Пятиметровый), Майкубен, Богатырь, были использованы при разработке и создании опытной установки при апробировании технологии в полевых условиях.

Впервые на угольном разрезе ТОО «Богатырь Комир» (Экибастузский бассейн) были проведены полевые испытания по апробации технологии, получены акты испытания опытной установки от 28.10.19., и акт внедрения от 12.10.20 г. Был проведен электронагрев участка угольного пласта (на горизонте -85 м) площадью 20 м², в центре участка угольного пласта были пробурены две скважины, расположенные на расстоянии 1,0 метр друг от друга, были сняты на приборах соответствующие электрофизические показатели ток, напряжение, импульсы тока, и снимки прогрева участка тепловизором. Соответствующее подача тока 3,5 А и напряжения 2500 В осуществлялась через пульт управления. Был получен горючий газ с составом: Н₂ – 73,2 %, СО – 22,29 %, СН₄ – 5,12 %, СО₂ – 4,49 %, N₂ – 10,11 %, а также получены побочные продукты каменноугольная смола и карбонизованный остаток, испытания опытной установки и технологии внутрипластовой подземной конверсии угля прошли успешно, отработаны различные технологические режимы. В результате электронагрева, полученный горючий газ будет использован для производственных целей и нужд разреза.

Проведенные исследования в полевых условиях показывают возможность электропробоя и последующего нагрева на межэлектродном расстоянии в десятки метров и реализации технологии в опытно-промышленном масштабе. Произведена оценка основных технико-экономических показателей применения разработанной опытной установки.

Методология работы

Расчеты уравнения температурной зависимости удельной теплоемкости для исследуемых углей месторождения Сарыадыр (пласт Надежный и Пятиметровый), Майкубен, Богатырь методом наименьших квадратов в интервале температур 298,15–473 К на основании полученных экспериментальных данных, прогнозируем о пригодности углей газификации путем электронагрева. Методология работы включает предварительное математическое и физическое моделирование в камере укрупненной лабораторной установки исследование интенсивности и динамики частичных при прохождении через угольный пласт в единицу времени в зависимости от прикладываемого напряжения и тока, которые служат индикаторами начала триинга и электротеплового пробоя.

Методы исследования

Для изучения процессов пиролизической конверсии угля использовались физико-математические модели, а также экспериментальные исследования физико-химических и технических свойств угля: методом графического дифференцирования термогравиметрической кривой, методом калориметрии. Исследование диэлектрических и электрофизических свойств проводилось с помощью измерителя «иммитанса Е7-20». Аппроксимация полученных результатов проведена расчетным способом по методу наименьших квадратов. Состав полученного газа, определяли хроматографическим методом. Все измерения выполнены на аккредитованных современных приборах и оборудовании, внесенные в Государственный реестр измерительных приборов.

Положения, выносимые на защиту

1. На основании приведенных опорных данных термодинамических вычислений теплоемкости C_p^0 , [Дж/(г·К)] в интервале температур 298,15-473 К для исследуемых углей месторождений Сарыадыр (Надежный) марки ГЖ, Сарыадыр (Пятиметровый) марки ГЖО, Богатырь марки КСН, Майкубен марки Бз, выведены уравнения температурной зависимости теплоемкости.

2. Увеличение скорости нагрева углей в диапазоне 3 -15°C /мин, в температурном интервале от 30°C до 900°C, приводит к уменьшению степени термической деструкции органической массы угля (ОМУ) для каменных углей Сарыадыр (Надежный) марки ГЖ, Сарыадыр (Пятиметровый) марки ГЖО, Богатырь марки КСН и увеличению степени термической деструкции ОМУ для бурого угля месторождения Майкубен марки Бз.

3. На основании исследований электрофизических характеристик углей ($\varepsilon, \sigma, \tan \delta$) от частотной зависимости в диапазоне 10 Гц - 1 МГц выявлено, что исследуемые угли месторождения Сарыадыр (Надежный) марки ГЖ, Сарыадыр (Пятиметровый) марки ГЖО, Богатырь марки КСН, Майкубен марки Бз относятся к слабопроводящим материалам гетерофазного строения и достаточно выраженной поляризационной способностью, располагаются на границе между полупроводниками и диэлектриками.

4. На основании проведенных расчетов теплотворной способности полученных газов для исследуемых углей месторождений Сарыадыр (Надежный) марки ГЖ, Сарыадыр (Пятиметровый) марки ГЖО, Богатырь марки КСН, Майкубен марки Бз, выявлено, что полученная энергия в результате электронагрева угольного пласта, превышает затраченную энергию более чем в 50 раз.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обосновывается хорошим согласованием теплофизических расчетов и эксперимента, применения современных аналитических методик при исследовании состава продуктов, полученных путем пиролизического разложения при подземном нагреве.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы были представлены на следующих научных международных конференциях, симпозиумах, семинарах и форумах: XV Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых имени Л. П. Кулёва «Химия и химическая технология в XXI веке» (Россия, Томск, 2014 г.); Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Е.А. Букетова (г.Караганды, 2015 г.); Международный Российско-Казахстанский Симпозиум «Углекислотная химия и экология Кузбасса Кемерово» (Россия, Кемерово, 7-10 октября 2018 г.); Международная научно-практическая конференция «Инновации в области естественных наук как основа экспортоориентированной индустриализации Казахстана», посвященной 10-летию Казахской национальной академии естественных наук и 25-летию Национального центра по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан» (г. Алматы, 2019 г.); Международный Российско-Казахстанский Симпозиум «Углекислотная химия и экология Кузбасса Кемерово» (Россия, Кемерово, 7-10 октября 2019 г.); Научно-практическая конференция «Угольная теплоэнергетика в Казахстане: Проблемы, Решения. Перспективы развития», сборник тезисов выступлений (Nazarbayev University 27-28 февраля 2020г, РК, г Нур-Султан); Международный Российско-Казахстанский Симпозиум «Углекислотная химия и экология Кузбасса» (Россия, г.Кемерово, 12-13 июля 2021 г.).

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии при проведении экспериментов, обработке, анализе, математическом и физическом моделировании, интерпретации и обобщении полученных научных результатов по данной диссертационной работе. Автором лично написаны основные научные работы по теме диссертации.

Публикации

По материалам диссертационной работы опубликовано 21 научных работ, из них 7 статей в журналах, индексируемых в базах Scopus и WoS и 7 статей в рецензируемых журналах, в том числе ВАК, прочие - 7 статей. Получены 2 патента на изобретение и 1 патент на полезную модель, опубликованы 4 монографии.

Связь темы диссертации с научными проектами: работа выполнена в рамках финансирования МОН РК научно-технических проектов по бюджетной программе 217 «Развитие науки», подпрограмме 102 «Грантовое финансирование научных исследований», по приоритету: «*Рациональное использование природных ресурсов, в том числе водных ресурсов, геология, переработка, новые материалы и технологии, безопасные изделия и конструкции*» по теме: ИРН АР05131004 «Разработка технологии подземной газификации углей Экибастузского и Майкубенского бассейна и создание опытно-промышленной установки».

Структура и объем диссертации Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы 133 наименований и 5 приложений. Работа изложена на 176 страницах машинописного текста. Иллюстрированный материал содержит 77 рисунков и 19 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и степень разработанности темы диссертации, на основании анализа литературных данных сформулированы цели и задачи работы, определены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлена структура диссертационной работы и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены и приведены сведения, что добыча альтернативных источников энергии и топлива в XXI века только набирает обороты и, судя по всему, имеет значительные перспективы. По нашему мнению, значительный потенциал для развития имеют технологии внутрипластовой переработки твердых ископаемых топлив путем электронагрева, в сопоставлении термической переработкой углей. Этот подход сочетает в себе и преимущество использования низкосортных топлив, и возможность глубокой переработки органических пород. Для конверсии органической массы твердых топлив предлагается использовать электрофизический нагрев породы непосредственно на месте залегания пласта и пиролизическую деструкцию с образованием газообразных жидких и твердых продуктов. Доступ к угольному пласту при этом должен осуществляться через скважины. Electroды, соединенные силовыми кабелями с наземным электрофизическим оборудованием, погружаются в скважины на уровень продуктивного пласта. Для выделения тепловой энергии в пласте могут использоваться такие электрофизические эффекты, как диэлектрические и резистивные потери, плазма частичных разрядов в порах, электрический триинг, электротепловой пробой, разрядно-плазменные явления. Отбор газообразных и парообразных продуктов пиролиза может осуществляться как через скважины с электродами, так и через дополнительные скважины. В настоящее время применения подобных технологий в промышленных масштабах не встречается.

Во второй главе проведено лабораторное исследование теплофизических свойств образцов каменных углей Сарыадыр (Надежный) марки ГЖ, Сарыадыр (Пятиметровый) марки ГЖО, энергетического угля Богатырь марки КСН и бурого угля Майкубен марки Бз.

Исследование эффективной теплоемкости углей проводили методом динамической калориметрии на серийном приборе ИТ-С-400 в интервале 298,15-473 К. Верхний предел температуры (473 К) взят из-за того, чтобы выше этой температуры начинаются изменение веса угля и процессы набухания. Принцип работы калориметра, основывается на сравнительном методе динамического калориметра с тепломером. Измерительная схема прибора обеспечивает замер уровня температуры от “минус”100 до “плюс”400°С в фиксированных точках через каждые 25 К при помощи встроенного в прибор потенциометра постоянного тока и переключателя. Объемный диапазон не менее $10 \cdot 10^6$ Дж/К·м³. Время, затрачиваемое на измерение во всем интервале температур, с обработкой экспериментальных данных не более 2,5 часов. Максимальная погрешность измерения на приборе ИТ-С-400, согласно паспортным данным, равна $\pm 10\%$.

При каждой температуре проводилось по пять параллельных опытов, полученные результаты усреднялись и обрабатывались методами математической статистики. Для усредненных значений удельной теплоемкости при каждой температуре рассчитывали среднеквадратичные отклонения ($\bar{\delta}$, Дж/моль) по формуле (1):

$$\bar{\delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}{n-1}} \quad (1)$$

где: n – количество экспериментов; C_i – измеренное значение удельной теплоемкости; $\bar{C}$ – среднее арифметическое из измеренных значений удельной теплоемкости. Систематическая составляющая погрешности определялась по формуле (2):

$$\Delta_c = \frac{\bar{C} - C_0}{C_0} \cdot 100, \quad (2)$$

Результаты полученных термохимических вычислений теплоемкости C_p^0 , [Дж/(г·К)] исследуемых углей в интервале температур 298,15-473 К приведены ниже в таблице 1.

Таблица 1 – Температурные зависимости удельных теплоемкостей углей, [Дж/(г·К)]

T, K	$C_p \pm \bar{\delta}$	
	1) Сарыадыр (Надежный)	2) Сарыадыр (Пятиметровый)
298,15	0,9757±0,0245	1,0558±0,0275
323	1,2329±0,0310	1,1572±0,0390
348	1,4526±0,0254	1,2531±0,0326
373	1,6445±0,0341	1,3893±0,0266
398	1,8153±0,0317	1,6646±0,0392
423	1,9699±0,0299	2,2095±0,0459
448	2,1117±0,0284	2,3833±0,0515
473	2,2435±0,0432	2,4930±0,0377
	3) Майкубен	4) Богатырь
298,15	1,0401±0,0289	1,0710±0,0341
323	1,1482±0,0265	1,7717±0,0336
348	1,2952±0,0269	1,8304±0,0311
373	1,6054±0,0356	1,8546±0,0204
398	1,9477±0,0433	2,3197±0,0188
423	2,1900±0,0369	2,2899±0,0155
448	2,3639±0,0511	1,6971±0,0192
473	2,4335±0,0453	0,7040±0,0211

На основании опорных данных, приведенных в таблице, выведены уравнения температурной зависимости теплоемкости углей. Приведены ниже соответственно уравнения теплоемкости [Дж/(г·К)] углей месторождений Сарыадыр (Надежный), Сарыадыр (пятиметровый), Майкубен, Богатырь:

$$C_p = (1,2794 \pm 0,0855) + (3,0579 \pm 0,2044) \cdot 10^{-3} T - (1,0789 \pm 0,0721) \cdot 10^{-5} T^2 \quad (298-473 \text{ K}) \quad (1)$$

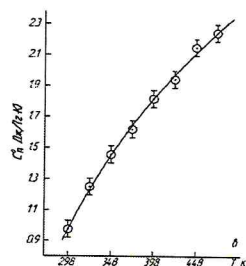
$$C_p = -(5,9350 \pm 0,3835) + (15,9373 \pm 1,0299) \cdot 10^{-3} T + (1,9905 \pm 0,1286) \cdot 10^{-5} T^2 \quad (298-473 \text{ K}) \quad (2)$$

$$C_p = -(1,96 \pm 0,12) + (9,03 \pm 0,54) \cdot 10^{-3} T + (0,27 \pm 0,02) \cdot 10^{-5} T^2 \quad (298-473 \text{ K}) \quad (3)$$

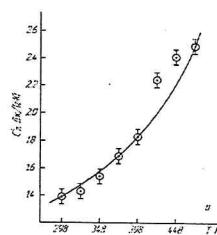
$$C_{p(1)} = (3,98 \pm 0,22) - (0,14 \pm 0,01) \cdot 10^{-3} T - (2,55 \pm 0,14) \cdot 10^{-5} T^2 \quad (298-373 \text{ K}) \quad (4)$$

$$C_{p(2)} = (9,90 \pm 0,53) - (19,05 \pm 1,03) \cdot 10^{-3} T \quad (398-473 \text{ K}) \quad (5)$$

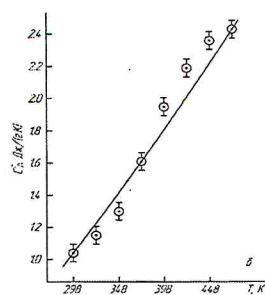
Ниже на рисунке 1 представлены графические зависимости $C_p \sim f(T)$ исследуемых углей.



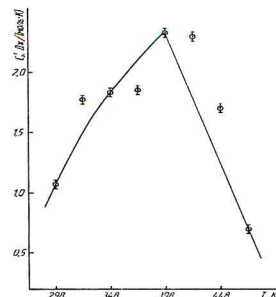
а) Сары-Адыр (Надежный)



б) Сары-Адыр (Пятиметровый)



в) Майкубен



г) Богатырь

Рисунок 1 — Зависимость теплоемкости углей от температуры: а) Сарыадыр (Надежный), б) Сарыадыр (Пятиметровый), в) Майкубен, г) Богатырь

Выводы по разделу 2: На основании экспериментальных данных были рассчитаны теплофизические показатели исследуемых углей. Таким образом, определив величину удельной теплоемкости, можно прогнозировать пригодность углей к их пиролизической переработке для получения синтетического газа. Знание условий теплофизических закономерностей протекания химических реакций позволяет управлять сложными физико-химическими процессами. Полученные результаты представляют определенный практический интерес для прогнозирования теплотворной способности, теплопроводности, температуропроводности углей аналогичных месторождений.

В третьей главе рассмотрены результаты исследования кинетики термического разложения каменных углей Сарыадыр (Надежный) марки ГЖ, Сарыадыр (Пятиметровый) марки ГЖО, энергетического угля Богатырь марки КСН и бурого угля Майкубен марки Бз. А также методика проведения термогравиметрического анализа для определения кинетических параметров термического разложения угля. Эксперименты проводили на дериватографическом анализаторе при разных скоростях нагрева в диапазоне 3-15 град/мин и фракцией образцов угля с размерами гранул $d = 0,2$ мм. Нагрев образцов проводился в керамических тиглях в интервале температур 25-900 °С в инертной среде азота. Навеска образцов составляла 1 грамм. Эксперимент проводился в два этапа. На 1-ом этапе температуру поднимают от комнатной 25°С до 40 °С и при этой температуре выдерживают 15 минут для стабилизации температуры. На втором этапе тестовый образец в тиглях с закрытой крышкой нагревают от 40 °С до 915 ± 3 °С. При этом, скорость нагрева при разных экспериментах устанавливают: 3, 6, 9, 12, 15 °С/мин. При нагреве печи прибор ТГА взвешивает закрытые тигли через определенные промежутки времени и фиксирует данные в специальной программе. Когда для обеспечения нейтральной атмосферы использовали азот, показатели потока сушильного газа устанавливались в количестве от 0,4 до 1,4 от изменений объема печи за минуту. Когда в качестве окислительного газа использовали кислород, показатели потока устанавливались от 1,3 до 1,4 от изменений объема печи за минуту.

Расчет кинетических параметров исследуемого процесса определяется из данных специальной программы (на компьютере), в которой отображаются значения масс образцов угля (мг), скорости нагрева (°С/мин), времени (сек), температур (°С). Данные параметры фиксируются через определенные промежутки времени в течение всего периода за программируемого нагрева.

Определено, что изменение массы угля происходит в пять стадий. Температурному интервалу 25°С -110°С соответствует стадия I, что соответствует выделению пирогенной воды. II стадия соответствует к интервалу 110-450 °С, где под действием температуры из молекулы органического вещества угля начинают выделяться в первую очередь, газообразные вещества, в основном диоксид углерода и сероводород. Скачок в изменении массы стадии III при температуре 450-550 °С объясняется тем, что в данном интервале температур начинает выделяться смола, эту стадию обычно связывают с процессом битуминизации, когда начинает образовываться основная масса угольной смолы, но при этом недостаточно тепла для ее испарения. При дальнейшем нагревании (выше 550 °С) выделяется небольшое количество газа, смола почти не выделяется, поэтому на стадии IV выход летучих компонентов не значительный. Далее на стадии V в температурном интервале 860-900 °С наблюдается еще один скачок в потере массы, это объясняется тем что в данном температурном интервале происходит активное разложение минеральной части угля.

Результаты обработки кривых DTG при различных скоростях нагрева в диапазоне 3-15 град/мин, данные представлены в таблицах 2-3.

Степень конверсии угля месторождения Сарыадыр (Пятиметровый) при пиролизе уменьшается при сокращении времени пребывания частиц угля в высокотемпературной зоне, о чем свидетельствует некоторое снижение потери массы угля (с 31,6-30,9 %) в диапазоне 3-15 град/мин) при повышении скорости нагрева (таблица 2).

Таблица 2 – Потери масс образцов пробы угля месторождения Сарыадыр (Пятиметровый) марка ГЖО в различных температурных интервалах и значения T_{max} на стадиях разложения

Скорость нагрева, °С /мин	Потеря массы от навески, %			T_{max} , °С	
	30-300°С	300-600°С	30-900°С	Стадии разложения	
				1	2
3	4.796	26.899	31.641	35.16	681.79
6	3.549	25.863	29.422	61.53	438.63
9	3.561	25.446	29.183	69.95	450.38
12	3.507	25.642	29.306	71.58	454.06
15	4.457	26.478	30.935	77.32	461.51

Для угля месторождения Сарыадыр (Надежный) показано некоторое снижение потери массы угля с 28,3 до 22,1 %, при повышении скорости нагрева в диапазоне 3-15 град/мин (таблица 3).

Таблица 3 – Потери масс образцов пробы угля месторождения Сарыадыр (Надежный) марка ГЖ в различных температурных интервалах и значения T_{max} на стадиях разложения

Скорость нагрева, °С /мин	Потеря массы от навески, %			T_{max} , °С	
	30-300°С	300-600°С	30-900°С	Стадии разложения	
				1	2
3	2.930	25.164	28.269	111.94	450.13
6	2.896	19.768	22.674	60.89	453.33
9	2.506	19.611	22.134	75.24	460.67
12	2.916	19.496	22.535	77.12	465.22
15	2.766	19.341	22.107	78.45	471.87

Для проб угля месторождения Майкубен (Шоптыколь) в диапазоне 3-15 град/мин, наблюдается некоторое повышение потеря массы навески с 19,3 до 38,3%, для проб угля месторождения Богатырь (Экибастуз) снижение потери массы с 21,3 до 19,4% (таблица 4,5).

Это связано с маркой исследуемых образцов углей Сарыадыр (Пятиметровый и Надежный), Богатырь относятся к каменным, а Майкубен бурым марки Бз, соответственно из-за разной структуры морфологического состава, тенденция потери массы навесок разные.

Таблица 4 – Потери масс образцов пробы угля месторождения Майкубен марка Бз(Шоптыколь) в различных температурных интервалах и значения T_{max} на стадиях разложения

Скорость нагрева, °С /мин	Потеря массы от навески, %			T_{max} , °С	
	30-300°С	300-600°С	30-900°С	Стадии разложения	
				1	2
3	1.909	17.579	19.380	71.26	484.6
6	10.800	29.367	40.648	75.90	439.38
9	9.619	29.108	38.849	80.95	442.42
12	9.819	27.658	37.477	87.87	483.43
15	10.108	28.043	38.336	90.20	452.16

Таблица 5 – Потери масс образцов пробы угля месторождения Богатырь марки КСН (Экибастуз) в различных температурных интервалах и значения T_{max} на стадиях разложения

Скорость	Потеря массы от навески, %	T_{max} , °С
----------	----------------------------	----------------

нагрева, °С /мин	30-300°С	300-600°С	30-900°С	Стадии разложения	
				1	2
3	2.009	19.225	21.369	52.67	448.76
6	1.661	17.342	19.080	57.83	462.90
9	2.866	19.814	22.674	62.74	453.33
12	1.866	17.215	19.081	68.35	477.51
15	1.909	17.579	19.380	71.26	484.67

Анализ полученных данных показывает, что для всех образцов исследуемых углей в температурных интервалах 30-300 °С потери массы ОМУ имеют наименьшие значения (таблица 4-5). В интервале температур 300-600 °С, где наблюдается второй и третий максимумы, наблюдаются более высокие потери массы ОМУ. По-видимому, это связано с выделением основной массы паров смолы и газообразных углеводородов с одновременным образованием паров так называемой пирогенетической воды. В общем температурном интервале 30-900 °С потери массы ОМУ – невысокие, вследствие большого содержания зольности и небольшого количества летучести веществ.

Каменные угли месторождения Богатырь, Сарыадыр - высокозольные, при нагревании обладают наименьшей реакционной способностью (степень разложения менее 30%), что обусловлено низким количеством кислородсодержащих соединений и высоким содержанием углерода. Минимальные потери массы связаны также с меньшим содержанием влаги (2-3%). Более высокая стадия метаморфизма данных углей обусловлена тем, что их структура обладает высокой степенью сшитости и большим количеством развитых полиароматических образований. При нагревании таких топлив выход смол незначителен. При этом, протекают в основном реакции отщепления от макромолекул относительно небольших групп и боковых цепей с последующей циклизацией и упорядочением структуры.

Выводы к разделу 3

Проанализирована зависимость кинетических параметров термодеструкции угля в интервале температур основного разложения ОМУ от скорости и температуры нагрева и фракционного состава, а также между кинетическими параметрами на разных стадиях основного разложения угля. Установлено, что скорость нагрева образцов угля заметно повышает значения температуры $T_{\max}$ и скорости $v_{\max}$ деструкции, а также ведет к снижению активационного барьера в процессе пиролиза. Таким образом изучено влияние скорости нагрева и фракционного состава ОМУ на кинетические параметры процесса термической деструкции, выявлено, что увеличение скорости нагрева приводит к уменьшению степени термохимической деструкции органической массы угля (ОМУ) для каменных углей Сарыадыр (Надежный), Сарыадыр (Пятиметровый), Богатырь и повышению степени деструкции ОМУ в случае бурых углей.

В четвертой главе рассмотрены результаты исследования электрофизических свойств и частотных характеристик при электротепловом нагреве в исследуемых образцах углей. Измерение диэлектрических свойств проводилось измерителем иммитанса Е7-20 (МНИПИ, г.Минск). Прибор генерирует синусоидальное напряжение заданной частоты, подаваемое на измерительные электроды, и измеряет электромагнитный отклик объекта, базовая погрешность $\pm 0,1$ %. Поскольку для измерений во всем частотном диапазоне требовалось провести регистрацию большого количества измеряемых значений, для упрощения процедуры было разработано программное обеспечение для управления прибором. Измерения проведены в двухэлектродной измерительной системе на образцах в форме плоскопараллельных пластинок толщиной не более 5 мм. Для измерения использовались дисковые накладные электроды диаметром 50 мм. Для каждого месторождения измерения проводились на 6 образцах с последующим усреднением полученных результатов.

Ископаемые угли с точки зрения электрофизических характеристик относятся к слабопроводящим материалам гетерофазного строения. Протекание электротепловых явлений в таких материалах зависит от диэлектрических свойств. Например, максимальная напряженность на газовых включениях будет определяться относительной диэлектрической проницаемостью, а выделение тепла под действием приложенного поля зависит от электропроводности (резистивные потери) и тангенса угла диэлектрических потерь (диэлектрические потери). Для исследуемых углей были измерены частотные зависимости удельной электропроводности,

относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь, чтобы оценить возможность применения разных способов электрофизического воздействия для нагрева подземного угольного пласта.

Диэлектрическая проницаемость ϵ является показателем поляризационной способности материала. Чем выше ее величина, тем больший емкостный ток может циркулировать через материал при воздействии переменного напряжения. Помимо большого значения емкостного тока, высокая величина ϵ приводит к неравномерному распределению приложенного внешнего напряжения. В результате, на порах и газообразных включениях концентрируется значительная напряженность, вызываемая эффектом Максвелла-Вагнера. В соответствии с этим явлением, на границах раздела твердой и газообразной фаз накапливается заряд, величина которого пропорциональна отношению диэлектрических проницаемостей. Таким образом, из-за высокого значения ϵ рассматриваемых углей, при приложении внешнего электромагнитного поля к углям основная часть напряжения будет падать на порах, вызывая появление частичных разрядов при относительно малой величине внешнего напряжения.

Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ показывает отношение активной мощности к реактивной мощности при приложении переменного напряжения к фрагменту диэлектрического материала. Активная мощность, которая является мощностью диэлектрических потерь, возникает в результате смещения полярных атомарных групп под действием внешнего поля. Для большинства полярных диэлектрических материалов величина $\text{tg}\delta$ снижается с увеличением частоты, имея на некоторой частоте резонансный максимум. На этой частоте происходит совпадение скорости изменения внешнего поля и скорости свободной подвижности диполей вещества. Это свойство используется в методах высокочастотного нагрева материалов. Для материалов смесового строения частотная зависимость тангенса угла потерь будет представлять собой огибающую резонансных пиков различных компонентов.

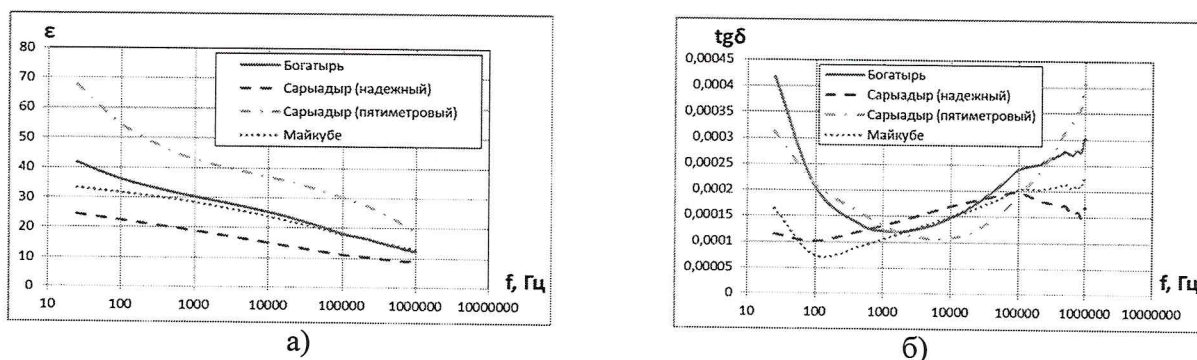


Рисунок 2 – Результаты измерений диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) для углей разных месторождений Казахстана

Результаты измерения диэлектрической проницаемости показывают высокую поляризационную способность углей на низких частотах, что свидетельствует о наличии химически несвязанной влаги. С возрастанием частоты диэлектрическая проницаемость уменьшается. При воздействии низкочастотного поля это будет приводить к неравномерному распределению напряженности поля внутри образца, и возникновению высокой напряженности на включениях, обладающих низким значением ϵ .

Величина тангенса угла потерь в рассматриваемом частотном диапазоне имеет небольшое значение, не превышающее 0,0005. Диэлектрических нагрев при таком низком значении $\text{tg}\delta$ и высокой поляризационной способности не целесообразен. Возрастание величины $\text{tg}\delta$ вблизи 1 МГц говорит о возможном наличии резонансных пиков в области более высоких частот, однако нагрев подземного пласта на более высоких частотах в работе не рассматривался.

Выводы по разделу 4

Исследование электрофизических свойств и характеристик при электротепловом нагреве в исследуемых образцах углей, показывает, что с точки зрения электрофизических свойств рассматриваемые угли месторождения Сарыадыр (Надежный) марки ГЖ, Сарыадыр (Пятиметровый) марки ГЖО, Богатырь марки КСН, Майкубен марки Бз являются слабопроводящими материалами с выраженной поляризационной способностью.

Высокая величина диэлектрической проницаемости свидетельствует о наличии влаги. Таким образом, электропроводность имеет как электронные, так и ионные компоненты. Тангенс угла потерь в диапазоне частот до 1 МГц весьма незначителен. Фазовое распределение частичных разрядов типично для полупроводящего материала и свидетельствует о интенсивной деградации под действием триинга. Напряженность пробоя экспоненциально уменьшается с увеличением межэлектродного расстояния, что дает возможность прогнозировать реализуемость пробоя на значительных межэлектродных расстояниях.

В пятой главе исследовано физическое моделирование подземного нагрева углей в камере лабораторной установки и проведены натурные испытания на опытной установке по подземной газификации способом электронагрева на участке угольного пласта, горизонта -85 м разреза Богатырь. Внутрипластовая конверсия твердых топлив предполагает нагрев угольного пласта непосредственно в условиях залегания. Для исследований производилась имитация условий подземного пласта для исследуемых образцов углей. Имитировались такие критерии подобия, как пластовое давление и напряженность электрического поля.

Максимальное выходное напряжение составляет 100 кВ промышленной частоты, максимальный выходной ток – 240 А промышленной частоты. Выходное напряжение регулировалось плавно в трех диапазонах: 0...220 В, 0...10 кВ, 0..100кВ.

В процессе эксперимента измерялось динамика температуры в определенных точках образца для построения картин динамики теплового поля и сравнения экспериментальных результатов с расчетными данными.

Нагреву подвергались образцы угольных пластов марки ГЖ Сарыадыр (Надежный), марки ГЖО Сарыадыр (Пятиметровый), марки КСН Богатырь, марки Бз Майкубен в форме параллелепипеда, вырезанные из цельного угольного фрагмента на камнерезном станке абразивно-отрезным диском с алмазным покрытием (рисунок 3).

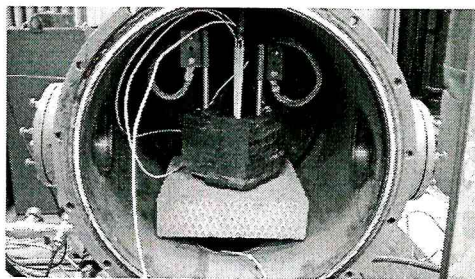


Рисунок 3 – Образец углей в камере опытной установки

Методика экспериментов заключалась в следующем. Образец с установленными электродами и термопарами помещался в камеру. Электроды и термопары соединяются проводниками с электрическими вводами камеры, которые изолированы от корпуса камеры керамическими изоляционными трубками. Вводы герметизированы с помощью грибового уплотнения и обеспечивают герметичность камеры. После герметизации и вакуумирования, камера заполнялась азотом до рабочего давления, которое в эксперименте составляло 2 кгс/см² и поддерживалось постоянным. Снаружи к электрическим вводам камеры подключались выводы электрооборудования установки. Путем подачи высокого напряжения сначала производился пробой образца. Далее установка переключается с высоковольтного на силовоточный режим работы, и производится нагрев образца пропусканием тока через канал пробоя. В конце эксперимента производился отбор пробы газа из камеры для анализа. Отбор проб производился через прямой шланг, соединяющий камеру и хроматограф. Мощность нагрева в течение всего времени нагрева составляла ~600 Вт.

До и после нагрева производился замер массы образца для вычисления массы потери. Сводные данные по экспериментальным исследованиям приведены таблице 6.

Таблица 6 – Сводные данные по физическому моделированию подземного нагрева углей марки ГЖ Сарыадыр (Надежный), марки ГЖО Сарыадыр (Пятиметровый), марки КСН Богатырь, марки Бз Майкубен.

Параметры	Образец
-----------	---------

	Богатырь	Майкубен	Сарыадыр (надежный)	Сарыадыр (пятиметровый)
Исходная масса образца, кг	5,590	5,067	4,199	4,316
Масса после нагрева, кг	5,022	4,155	3,993	3,842
Потеря массы, г	568	912	206	474
Объем газа, м ³	0,764	1,066	0,175	0,432
Средняя молярная масса газа, г/моль	7,65	10,85	9,34	9,09
Удельная теплотворная способность газа, МДж/м ³	13,89	11,93	14,18	19,16
Удельная теплотворная способность газа, ккал/м ³	3320	2851	3389	4577
Расчетная масса газа, г	261	516	73	175
Расчетная масса жидких продуктов, г	307	396	133	299
Электроэнергия, затраченная на нагрев, кВт·ч	4,54	1,94	0,78	3,39

Состав полученных газов определяли на газовом хроматографе, марки «Agilent 7890 А» с детектором ПИД, погрешность измерений $\pm 5\%$, Результаты анализа и калорийность полученного газа приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Состав и калорийность пиролизного газа, полученного из углей марки ГЖ Сарыадыр (Надежный), марки ГЖО Сарыадыр (Пятиметровый), марки КСН Богатырь, марки Б₃ Майкубен

Компонент	Майкубен	Богатырь	Сарыадыр (пятиметровый)	Сарыадыр (надежный)
H ₂	66,99	73,15	63,97	67,44
CO	21,35	13,29	9,89	16,61
CH ₄	4,81	10,64	19,90	10,80
CO ₂	6,41	2,13	1,70	3,58
C ₂ H ₂	0	0	0,03	0,14
C ₂ H ₄	0,12	0,26	1,15	0,69
C ₂ H ₆	0,29	0,44	1,20	0,55
C ₃ H ₆	0,01	0,03	0,12	0,09
C ₃ H ₈	0,02	0,01	0,14	0,07
C ₄ H ₁₀	0	0,04	1,88	0
Калорийность, МДж/м ³ (ккал/м ³)	11,93 (2851)	13,89 (3320)	19,15 (4577)	14,18 (3389)

Методика подготовки площадки и проведения исследований

Планировка испытательной площадки

Испытания проводились на угольном разрезе ТОО «Богатырь Комир». Испытательная площадка находилась на открытой поверхности участка угольного пласта (на горизонте -85 м), на самом глубоком участке карьера. Для проведения испытаний на площадке были выделены два участка размерами 4 м×5 м. Каждый из участков представляет собой фрагмент угольного пласта, на котором предполагается проведение нагрева угля. На одном из подготовленных к испытаниям участков был произведен пробный нагрев. На одном из подготовленных к испытаниям участков был произведен нагрев. Глубина скважин на участке составила 0,5 м от поверхности грунта. Расстояние между скважинами по осям превенторов составило 1,0 м.

Подключенные к скважинам электроды были соединены с повышающим трансформатором ОМ-25/10, предназначенным в данной опытной установке для подачи на электроды напряжения в диапазоне 250...10000 В. Питание трансформатора производилось от регулятора РОТМ-250/0,5. В качестве непосредственно регистрируемых величин использовались напряжение и ток на выходе регулятора. При использовании повышающего трансформатора ОМ-25/10, измеряемые значения были поправлены на коэффициент трансформации этого изделия. В качестве расчетных величин определялись мощность на нагрузке и сопротивление межэлектродного участка. Для измерения напряжения и тока использовалась беспроводная измерительная система Fluke CNX 3000 с функцией самописца. Период регистрации значений был задан равным 5 секунд.

Известно, что сопротивление межэлектродного участка снижается по мере нагрева. На начальной стадии нагрева сопротивление межэлектродного участка велико и составляет десятки-сотни кОм на метр длины. В связи с этим, реализация нагрева затруднительна, поскольку требуется высокое напряжение для выделения в подземном участке большой мощности. По мере прогрева сопротивление межэлектродного участка снижается до единиц-долей Ом, что с технической стороны облегчает проведение нагрева. Таким образом, интерес представляет динамика сопротивления межэлектродного участка во времени при известной величине вводимой мощности.

Нагрев производился в течение рабочего дня, на ночь нагрев останавливался. Такой график работы был выбран по причине того, что на разрезе отсутствовали условия для круглосуточной работы. Однако в течение нагрева замечена четкая зависимость динамики сопротивления межэлектродного участка от времени нагрева. По мере нагрева в течение дня сопротивление снижалось, а на следующее утро сопротивление было выше и соответствовало середине предыдущего дня. Поэтому в начале каждого дня сначала был этап «предварительного» нагрева, за которым следовал этап продуктивного нагрева. Это дает веские основания утверждать о зависимости сопротивления канала от температуры в пласте и стадии карбонизации. Основываясь на этом предположении, была проведена «сшивка» графиков с вычетом ночного времени и этапа «предварительного нагрева», компенсирующего ночное остывание канала (рисунок 5).

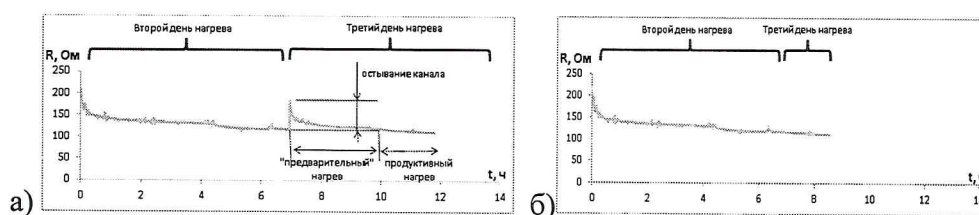


Рисунок 5 – Демонстрация способа «сшивки» графиков на примере графика сопротивления межэлектродного участка от времени: а) исходный график; б) «сшитый» график (без учета «предварительного» нагрева)

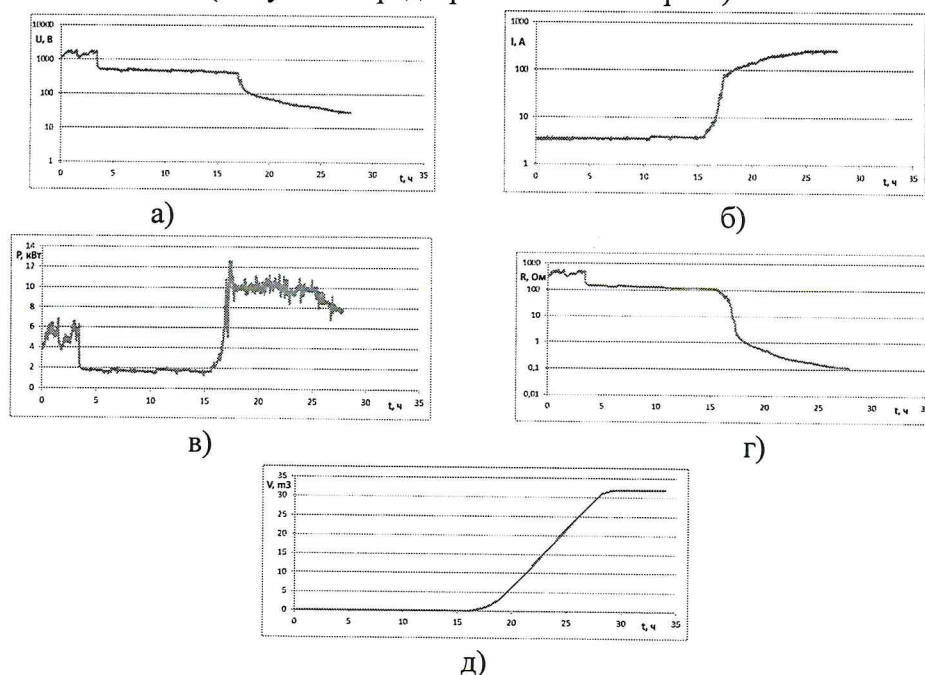


Рисунок 6 – Непрерывные диаграммы электрических параметров и выхода газа во времени – напряжение (а), ток (б), мощность (в) и сопротивление (г), выход газа (д)

Полученные в результате графики с некоторой долей допущения демонстрируют поведение электрических параметров для ситуации, как если бы нагрев производился непрерывно (рисунок 6). Такая форма представления графиков более удобна для анализа

динамики электрофизических параметров пласта. «Сшивка» всех электрофизических параметров производилась синхронно, и отсутствие существенных разрывов в графиках подтверждает верность предположения о возможности непрерывного представления графиков.

Рассмотрим поэтапно процессы, происходящие на разных этапах нагрева межэлектродного участка.

На первом этапе нагрева (0-3,5 часа от начала нагрева) сопротивление межэлектродного участка непостоянно и колеблется в диапазоне от 350 до 550 Ом. Мощность нагрева, вводимая в нагрузку на этом этапе, поддерживалась в диапазоне 4-6 кВт. Такое поведение сопротивления канала предположительно связано с начальным прогревом угля и испарением влаги. Свободная влага обеспечивает ионную проводимость. Во время предварительного нагрева одновременно происходит обрыв некоторых каналов из-за испарения влаги и формирования новых каналов. Каждый из этих каналов представляет собой путь протекания тока от одного электрода к другому. Электрически они являются параллельными цепями, поэтому вновь сформировавшийся низкоомный путь шунтирует другие каналы, и начинает принимать всю энергию на себя. Вновь сформировавшиеся каналы сначала резко снижают сопротивление межэлектродного участка, однако через некоторое время они нагреваются, и влага покидает канал. В этом случае ионная проводимость исчезает, и канал снова приобретает высокое сопротивление. Аналогичные флуктуации сопротивления межэлектродного сопротивления наблюдались и в лабораторных условиях. Нагрев на этом этапе производился звеном среднего напряжения установки. В этом звене выходным источником тока является трансформатор ОМ-25/10. Мощность нагрева на этом этапе ограничивалась максимальным током высоковольтной обмотки этого трансформатора, который составляет 4 А. Средняя мощность на этом этапе нагрева составила 4,98 кВт, количество затраченной электроэнергии составило 17,68 кВт·ч.

На этом этапе нагрева, в течение которого наблюдаются флуктуации сопротивления, продолжается до тех пор, пока не испарится вся влага из межэлектродной области. Далее протекающий ток уже не шунтируется каналами с ионной проводимостью, а протекает через сухой участок угольного вещества. Отсутствие влаги позволяет углю нагреться до температуры выше 100°C, в результате чего в какой-то момент начинается карбонизация и формируется более низкоомный канал. В проведенном эксперименте спустя 3,5 часа начального нагрева сопротивление межэлектродного участка резко снизилось с 400 до 150 Ом. С этого момента флуктуации сопротивления больше не возникают, а величина межэлектродного сопротивления является весьма стабильной величиной. По мере нагрева происходит расширение канала карбонизации, в результате чего сопротивление плавно снижается.

На втором этапе нагрева (3,5-16 часов от начала нагрева) величина вкладываемой мощности составляла около 2 кВт. На этом этапе не происходит значительных колебаний электрических параметров межэлектродного участка. За счет постепенного прогрева происходит карбонизация и расширение токового канала в межэлектродном участке, в результате чего сопротивление плавно снижалось. Однако скорость снижения сопротивления была небольшой из-за небольшой величины мощности и рассеяния тепла в подземном пласте. Величина вводимой мощности на этом этапе была ограничена максимальным током трансформатора ОМ-25/10, составляющим 4 А. На сопротивлении 130 Ом такой ток дает падение напряжения в 520 В, что позволяет выделять 2080 Вт джоулевого тепла. В то же время переключение на низковольтное звено при таком сопротивлении не даст увеличения мощности из-за недостаточно высокого напряжения. Если использовать в установке более мощный трансформатор промежуточного звена, этот этап нагрева был бы пройден за более короткий промежуток времени. Средняя мощность нагрева на этом этапе составляла 1,86 кВт, затраченная электроэнергия составила 24,62 кВт·ч.

Выделения газа через газовый счетчик на втором этапе не происходило, однако визуально был замечен выход газа через зазор между бетоном и превенторами, а также вблизи плиты ощущался характерный запах пиролизного газа.

На третьем этапе нагрева, когда сопротивление межэлектродного участка снизилось ниже 100 Ом, была проведена коммутация установки с подключением к нагрузке низковольтного звена. По мере снижения сопротивления пласта начал возрастать ток и, как следствие, мощность нагрева. При достижении мощности в 5 кВт началось активное выделение газа. Далее на этом

участке нагрева (16-25 часов от начала нагрева) мощность поддерживалась постоянной и равной ~10 кВт. На этом этапе происходило активное выделение газа.

В фазе активного нагрева выход газа в единицу времени характеризовался высокой постоянностью (рисунок 6.3д). Выход газа в единицу времени на этом участке составлял около 3 м³/час. Состав полученного газа и анализ карбонизованного остаточного угля Богатырь приведены в таблице 8 и 9.

Таблица 8 – Состав горючего газа месторождения Богатырь

Компонент объём, %	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂	N ₂	калорийность, МДж/м ³ (ккал/м ³)
Богатырь	22,29	4,49	5,12	73,20	10,11	10,91/2608

Таблица 9 – Физико-химические показатели карбонизованного образца угля Богатырь после электронагрева

Определяемый показатель	Фактически полученные результаты
Массовая доля аналитической влаги, W ^a , %	1,4
Зольность, A, %	47,7
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 , ккал/кг	4 625,39
Суммарный объем пор, см ³ /г	0,107
Насыпная плотность, г/см ³	0,8
Адсорбционная активность, %:	
-по метилоранжу	9,0
-по метилен голубому	12,5
-по иоду	10,16

За все время эксперимента на нагрев было затрачено 151 кВт·ч электроэнергии. Количество электроэнергии на входе установки, определенное электросчетчиком, составило 204,2 кВт·ч. Таким образом, за время эксперимента средний КПД установки составил 74% процента, что является неплохим показателем с учетом исследовательского характера установки. Наличие потерь в 26% обусловлено, главным образом, потерями в регуляторе РОТМ-250/0,5, что вызвано принципом регулирования напряжения за счет перемещения короткозамкнутого витка вдоль основного ярма магнитопровода. Повышенные токи в короткозамкнутом витке и насыщение магнитопровода не дают этому регулятору обеспечивать высокий КПД, характерный для большинства силовых трансформаторов. Однако плавность регулировки выходного напряжения делает его применение незаменимым в данной исследовательской установке. При проектировании промышленных установок могут быть использованы трансформаторы без регулировки, имеющие более высокий КПД.

Очевидно также, что при конверсии данного угля смолу следует рассматривать как один из основных продуктов конверсии наравне с газом, и вести ее отбор. Для осаждения смолы из аэрозольной фазы применять качественные фильтры. Помимо смолы, в баке сконденсировалось

несколько литров пирогенетической воды, которая потенциально также может являться источником полезных химических веществ и быть использовано для получения каких-либо продуктов.

Нагрев пласта осуществлялся через превенторы. В процессе нагрева температура превенторов поднималась до 550°C. На рисунке 7 показано инфракрасное изображение превенторов, зарегистрированное тепловизором Flir E50.

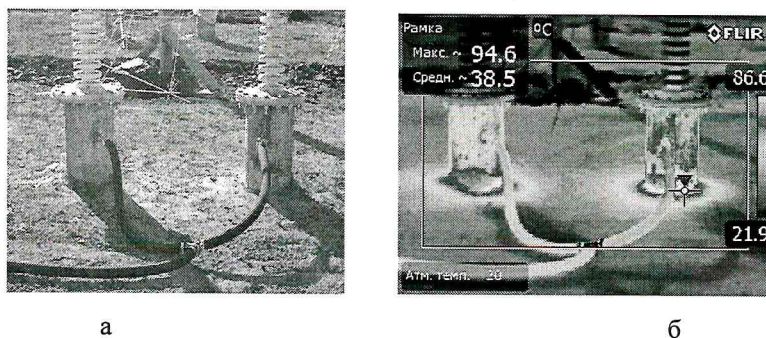


Рисунок 7 – Видимое (а) и инфракрасное (б) изображение превентора

Преенторы нагреваются не одинаково, что может свидетельствовать о том, что выход газа из одной скважины больше, чем из другой. Тепловой след от нагрева в межэлектродном пространстве не прослеживается, что предсказуемо и связано с низкой теплопроводностью как угля, так и бетона. После вскрытия скважины было снято инфракрасное изображение скважины. Видно, что наибольшая температура приходится на забой скважины. Это означает, что канал сформировался непосредственно от электрода в глубину межэлектродного расстояния. Максимальная температура на забое в момент вскрытия скважины составляла 331°C. Следует, однако, учесть, что за время от момента отключения питания и до момента снятия изолятора (несколько минут) произошло частичное остывание.

Выводы по разделу 5

Разработанная опытная установка смогла обеспечить весьма большой диапазон напряжений (до 100 кВ) и токов (до 300 А). При этом высоковольтный этап требует малого тока, а сильноточный этап – низкого напряжения. Исходя из этого, структуру установки оптимально разбили на звенья, работающие поочередно. В предложенной структурной схеме присутствуют три блока, работающих на разных этапах технологии – высоковольтное звено предназначено для пробоя межэлектродного участка, промежуточное звено производит первичный нагрев канала пробоя, сильноточное звено выполняет основной нагрев межэлектродного участка. Основными элементами установки являются силовые блоки – высоковольтный трансформатор, трансформатор промежуточного звена и регулирующий трансформатор. Их включение и выключение производится с помощью замыкания и размыкания входных коммутаторов, управляемых вручную с помощью пульта управления и контроля. Пульт помимо органов управления имеет индикаторы, отображающие величины токов и напряжений.

Процессы триинговой деградации в углях, происходящих под действием переменного напряжения, позволяют снизить напряжение пробоя по сравнению с электрическим пробоем на постоянном или импульсном напряжении. Напряжение пробоя зависит от дистанции между электродами по логарифмическому закону: при увеличении расстояния рост напряжения замедляется. Из исследуемых углей путем электронагрева можно получать газ с теплотворной способностью от 10 до 19 МДж/м³. Большую часть газа составляют водород, монооксид углерода и метан. В небольших количествах присутствуют углеводороды C₂-C₄, что положительно сказывается на калорийности газа.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проведен обширный аналитический обзор научно-технической литературы и патентов по технологии газификации традиционным и подземным способом, в результате показано, что существенным потенциалом для развития зеленой энергетики, является технология внутрипластовой переработки углей электрофизическим способом, который сочетает в себе

преимущество подземной конверсии углей и возможность их глубокой переработки в газ с высоким содержанием горючих компонентов.

2. На основании экспериментальных опорных данных теплоемкостей в интервале 298,15-473 К. для исследуемых углей месторождения Сарыадыр пласт (Надежный и Пятиметровый), Майкубен, Богатырь были выведены уравнения температурной зависимости удельной теплоемкости.

3. Исследована кинетика термического разложения органической массы (ОМУ) для углей Сарыадыр, пласт (Надежный и Пятиметровый), Майкубен, Богатырь в зависимости от скорости нагрева в диапазоне 3-15 град/мин и установлено, что увеличение скорости нагрева приводит к уменьшению степени термохимической деструкции органической массы угля и повышает значения температуры $T_{\max}$ и скорости $v_{\max}$ деструкции, а также приводит к снижению активационного барьера.

4. Исследованы электрофизические свойства и характеристики при электротепловом нагреве в исследуемых образцах углей, описана методика и результаты измерения частотных зависимостей от удельной электропроводности, относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь, измеренные в углях, взятых с месторождений Сарыадыр, пласт (Надежный и Пятиметровый), Майкубен, Богатырь.

5. Проведено физическое моделирование подземного нагрева исследуемых углей в камере опытной установки, установлено, что удельная мощность на единицу длины межэлектродного промежутка для устойчивого нагрева пласта должна составлять не менее 1 кВт/м³.

6. Проведено математическое моделирование подземного нагрева углей током в канале электротеплового пробоя. Результаты расчетов показывают, о возможности достижения температуры пиролиза в окрестности электродов за время в пределах 10 часов, при мощности нагрева 3 кВт на межэлектродном расстоянии 0,5м.

7. Проведены полевые испытания на участке (4х5) угольного пласта разреза «Богатырь», опытные исследования показали, о возможности электропробоя и последующего нагрева на межэлектродных расстояниях от 0,5м до десятки метров и мощности нагрева от 1 до 10 кВт в зависимости от расстояния между электродами площади нагреваемого участка для получения синтез газа с высоким содержанием горючих компонентов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Касенова Ж.М. Химический состав и электрофизические характеристики золы угля разреза «Богатырь» /Ермагамбет Б.Т, Касенов Б.К., Нургалиев Н.У, Касенова Ж.М., Казанкапова М.К., Куанышбеков Е.Е. // Химия твердого топлива. – Москва, 2020. – Номер 2. – С.43-49. DOI: 10.31857/S0023117720020024

[Kasenova Zh.M. Chemical Composition and Electrophysical Characteristics of the Ash of Bogatyr Coal / Ermagambet B.T., Kasenov B.K., Nurgaliev N.U, Kasenova Zh.M., Kazankapova M.K., Kuanyshbekov// Solid Fuel Chemistry. - 2020. - Vol.54. - No.2. - P.99-104. DOI: 0.3103/S0361521920020020] (BAK).

2. Касенова Ж.М. Электрофизические свойства и теплоемкость сланца Кендырлыкского месторождения / Ермагамбет Б.Т, Касенов Б.К., Нургалиев Н.У., Набиев М.А, Касенова Ж.М., Казанкапова М.К., Зикина А.М.// Химия твердого топлива. – Москва, 2018. – Номер 1. – С.68-72. DOI:0.1134/S0023117718050043

[Kasenova Zh.M. Electrophysical properties and heat capacity of shale from the Kendyrylyk Deposit /Yermagambet B. T., Kasenov B. K., Nurgaliev N. U., Nabiev M. A., Kasenova Zh.M., Kazankapov M. K., Zikirin A. M. // Solid Fuel Chemistry. – 2018. – Vol.52. – No.2. – P.11-14. DOI:0.3103/S0361521918020039] (BAK).

Публикации в изданиях, входящих в перечень базы Scopus, Web of Science

3. Kasenova Zh.M. Field test of in-situ conversion of coal /Sergey M. Martemyanov, Andrey A. Bukharkin, Bolat T. Ermagambet & Zhanar M. Kasenova //International Journal of Coal Preparation and Utilization, Received 29 Apr 2021, Accepted 15 Jul 2021, Published online: 22 Jul 2021. (электронный ресурс), DOI: 10.1080/19392699.2021.1957855.

4. Касенова Ж.М. Электрофизические свойства и теплоемкость пористо-углеродного материала из угля майкубенского бассейна/ Ермагамбет Б.Т, Касенов Б.К., Казанкапова М.К., Нургалиев Н.У, Касенова Ж.М., Куанышбеков Е.Е., Наурызбаева А.Т.// Химия твердого топлива. – Москва, 2020. – Номер 3. – С.61-67. DOI: 0.31857/S0023117720030032

[**Kasenova Zh.M.** Electrophysical Properties and Heat Capacity of a Porous Carbon Material from Coal of the Maikube Basin/ Ermagambet B.T., Kasenov B.K., Kazankapova M.K., Nurgaliyev N.U., Kuanyshbekov E.E., Kasenova Zh.M., Nauryzbaeva A.T.// Solid Fuel Chemistry. – 2020. – Vol.54. – No.3. – P.180-185. DOI: 10.3103/S0361521920030039] (Web of Science: IF - 0.841, квартиль-Q4; Scopus: процентиль-36).

5. **Kassenova Zh.M.** Simulation of subterranean heating of coal by passing electrical current through electrothermal breakdown channel/ Kassenova Zh.M., Yermagambet B.T., G.E. Remnev, S.M. Martemyanov, A.A. Bukharkin, N. U. Nurgaliyev. // News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan, series of Geology and Technical sciences, №3 (441). 2020, P.16-23.DOI:10.32014/2020.2518-170X.49 (IF-0,66, квартиль-Q4, Scopus: процентиль-40).

6. **Kassenova Zh.M.** Calculation of kinetic parameters of thermal decomposition of coals of various deposits of Kazakhstan/ Yermagambet B.T., Kassenova Zh.M., Nurgaliyev N.U., Kazankapova M.K., Martemyanov S.M. // News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan, series of Geology and Technical sciences, №4 (442). 2020, P.86-93.DOI:10.32014/2020.2518-170X.88 (IF-0,66, квартиль-Q4, Scopus: процентиль-40).

7. **Kasenova Zh.M.** Modeling of subterranean heating of coals of Maykuben and Ekibastuz basins /Kasenova Zh.M., Ermagambet B.T., Remnev G.E., Martemyanov S.M., Bukharkin A.A., Nurgaliyev N.U. // News of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. № 6 (438), 2019.-P.70-76 (IF-0,66, квартиль-Q4, Scopus: процентиль-40).

8. **Kasenova Zh.M.** Partial discharges and electric breakdown in coals of Maikuben, Ekibastuz and Korzhunkol basins /Ermagambet B.T., Remnev G.E., Martemyanov S.M., Kasenova Zh.M., Bukharkin A.A., Nurgaliyev N.U.// News of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. - 2019. - № 5 (437). - P.244-251. (IF-0,66, квартиль-Q4, Scopus: процентиль-40).

9. **Kasenova Zh.M.** Smokeless fuel production - semi-coke from coal /Yermagambet B.T., Nurgaliyev N.U., Kazankapova M.K., Kasenova Zh.M., Abylgazina L.D. // News of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan, series of Geology and Technical sciences. – 2019. - № 2. - С.144-148. (IF-0,66, квартиль-Q4, Scopus: процентиль-40).

10. **Kasenova Zh.M.** Dielectric properties of the coals of Maykuben and Ekibastuz basins /Yermagambet B.T., Remnev G.E., Martemyanov S.M., Kasenova Zh.M., Bukharkin A.A., N.U. Nurgaliyev. // Известия НАН РК, серия Химии и Технологии. – 2018. - 6 (432). - С. 38-43.

Объекты интеллектуальной собственности

11. Патент на изобретения № 31233. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РК 19.05. 2016. «Способ каталитической газификации угля углекислым газом». Авторы: Ермагамбет Б.Т., Бектурганов Н.С., **Касенова Ж.М.**, Реминный Р.А., Касенов Б.К., Нурғалиев Н.У., Букетаев А.С., Зулъхарнай Р.Н.

12. Патент Республики Казахстан на изобретение № 31990. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РК 17.03.2017. Способ комплексной переработки угля». Авторы: Ермагамбет Б.Т., **Касенова Ж.М.**, Нурғалиев Н.У., Бектурганов Н.С., Набиев М.А., Касенов Б.К., Бижанова Л.Н., Шалабаев Ж.А., Козлов П.В., Лаврентьев В.Л.

13. 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., Нурғалиев Н.У., Казанкапова М.К.

Научные публикации в прочих изданиях

14. **Касенова Ж.М.** Получение синтетического газа из угля/ Набиев М.А., Ермагамбет Б.Т., Нурғалиев Н.У., Касенова Ж.М., Реминный Р.А., Зикирина А.// Промышленность Казахстана, Алматы. - 2014. - № 6(87). - С. 68-71.

15. **Касенова Ж.М.** Получение горючего газа из Сарыадырского угля (пласт «Пятиметровый») /Ермагамбет Б.Т., Нурғалиев Н.У., Касенова Ж.М., Зикирина А.М., Холод А.В. // Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева. Астана. - 2016. - № 4 (113). - С. 312-315.

16. **Kassenova Zh.M.** Investigation of the thermal decomposition process of oil shale of the Shubarkol deposits//Yermagambet B.T, Nurgaliyev N.U, Kassenova Zh.M, Zikirina A.M, Abylgazina L.D. // Scientific jornal «European science». - 2016. – № 10(20). – P. 11-13.

17. **Касенова Ж.М.** Современные технологии комплексной переработки сланцев Казахстана /Ермагамбет Б.Т., Касенов Б.К., Касенова Ж.М., Казанкапова М.К., Нурғалиев Н.У. // Энергия будущего: инновационные сценарии и методы их реализации: материалы Всемирного Конгресса инженеров и ученых (19-20 июня, 2017, Астана, Казахстан). Под общ. Ред. Акад. Н.А. Абыкева, Б.Т. Жумагулова. – Т.3.- Алматы, 2017.- С 182-186.

18. **Касенова Ж.М.** Методика измерения электрофизических характеристик углей /Касенова Ж.М., Ремнев Г.Е., Ермагамбет Б.Т., Мартемьянов С.М., Нурғалиев Н.У. Методика измерения электрофизических характеристик углей // Проблемы современной науки и образования. - 2018.- №9 (129). - С. 9-12. (РИНЦ, Импакт-фактор - 1,72).

19. **Касенова Ж.М.** Технология подземной газификации угля методом электрофизического нагрева /Ермагамбет Б.Т., Мартемьянов С.М., Юдин А.С., Касенова Ж.М. // Международный Российско-Казахстанский Симпозиум «Углекислота и экология Кузбасса» г. Кемерово. - 2018- С.28.

20. **Касенова Ж.М.** Физическое моделирование внутрипластового нагрева угольного пласта /Ермагамбет Б.Т., Мартемьянов С.М., Касенова Ж.М., Бухаркин А.А. // Проблемы современной науки и образования. 2019 г.- № 3 (136). - С.5-10 (РИНЦ, Импакт-фактор -1,72).

21. **Kasenova Zh.M.** Modeling of subterranean heating of coals of Maykuben and Ekibastuz basins /Ermagambet B.T., Remnev G. E., Martemyanov S.M., Kasenova Zh.M., Bukharkin A.A. // Международный Российско-Казахстанский Симпозиум «Углекислота и экология Кузбасса Кемерово. 7-10 октября.- 2019. - С.20.

22. **Касенова Ж.М.** Применение газа из угля альтернативное решение в повышении энергоэффективности и экологичности предприятий /Ермагамбет Б.Т., Бектурганов Н.С., Зейнуллин А.А., Касенова Ж.М., Нургалиев Н.У.// Международная научно-практическая конференция «Инновации в области естественных наук как основа экспортоориентированной индустриализации Казахстана», посвященной 10-летию Казахской национальной академии естественных наук и 25-летию Национального центра по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан» - 2019. -С.116-120.

23. **Касенова Ж.М.** Теплосодержание золы угля месторождения «Каражыра»/ Ермагамбет Б.Т., Касенов Б.К., Нургалиев Н.У., Касенова Ж.М., Сыдыкова А.А. // Международная научно-практическая конференция «Инновации в области естественных наук как основа экспортоориентированной индустриализации Казахстана», посвященной 10-летию Казахской национальной академии естественных наук и 25-летию Национального центра по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан». - 2019 - С.468-470.

24. **Касенова Ж.М.** Испытания электрофизического нагрева угля на открытом участке пласта угольного разреза «Богатырь» /Ермагамбет Б.Т., Касенова Ж.М., Мартемьянов С.М., Бухаркин А.А.// Рецензируемый научный журнал «Тенденции развития науки и образования». Август 2020 г. №64, Часть 2, Изд. НИЦ «Л-Журнал», 2020. – С.126-131. (IF-0,072, РИНЦ)

25. **Касенова Ж.М.** Физическое моделирование и опытные испытания подземного нагрева угольного пласта / Ермагамбет Б.Т., Мартемьянов С.М., Касенова Ж.М., Бухаркин А.А., Нургалиев Н.У. // Научно-практическая конференция «Угольная теплоэнергетика в Казахстане: проблемы, решения и перспективы развития»: Сборник тезисов выступлений, 27-28 февраля 2020 года, Нур-Султан / Под общей ред. д.т.н. Сулейменова К.А. – NURIS, 2020. -С.90-94.

26. **Касенова Ж.М.** Опытные испытания подземного нагрева пласта на угольном месторождении «Богатырь»/ Касенова Ж.М., Ермагамбет Б.Т., Мартемьянов С.М., Бухаркин А.А., // Сборник тезисов X Международного Российско-Казахстанского Симпозиума «Углекислота и экология Кузбасса», посвященного 300-летию Кузбасса, г.Кемерово. – 12-13 июля 2021г., - С.42

Монографии

27. Ермагамбет Б.Т., Нургалиев Н.У., Казанкапова М.К., Касенов Б.К., **Касенова Ж.М.**, Холод А.В., Сайранбек Ә., Абылгазина Л.Д. Современные технологии комплексной переработки горючих сланцев Казахстана. Монография / – Астана, издательство «Шаңырақ медиа», 2017. – 164 с.

28. Ермагамбет Б.Т., Касенов Б.К., Нургалиев Н.У., **Касенова Ж.М.**, Набиев М.А., Шалабаев Ж.А. Технологии глубокой переработки углей Казахстана. Монография / – Dusseldorf, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 158 с.

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

30. Казанкапова М.К., Ермагамбет Б.Т., **Касенова Ж.М.** Пористо-углеродные материалы на основе углеродсодержащего сырья, Монография / – Нур-Султан, ИП «Булатов А.Ж.», 2020. - 387 с.