

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ТОО «ИНСТИТУТ ХИМИИ УГЛЯ И ТЕХНОЛОГИИ»

На правах рукописи

КАСЕНОВА ЖАНАР МУРАТБЕКОВНА

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

Специальность 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Г.Е. Ремнев

ТОМСК 2022

Оглавление

	ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1	Газификация твердых горючих ископаемых.....	17
1.1	История развития технологий процесса термической декомпозиции твердых горючих ископаемых.....	17
1.2	Обзор технологии подземной газификации углей электрофизическим способом.....	24
1.3	Физико-химические основы процесса термического разложения угля	34
Глава 2	Исследование теплофизических характеристик углей Казахстана.....	39
2.1	Методика проведения экспериментов и расчета теплофизических характеристик угля.....	39
2.2	Результаты экспериментальных работ и их обсуждение.....	42
Глава 3	Исследование кинетики термического разложения углей Казахстана.....	46
3.1	Методика проведения экспериментов на термогравиметрическом анализаторе.....	46
3.2	Методика проведения термогравиметрического анализа для определения кинетических параметров термического разложения угля.....	49
3.3	Метод расчета кинетических параметров термического разложения угля.....	50
3.4	Влияние скорости нагрева на степень термического разложения углей.....	55
Глава 4	Исследование электрофизических свойств и характеристик электроразрядных явлений в углях.....	59
4.1	Исследование электрофизических свойств углей.....	59
4.2	Исследование характеристик частичных разрядов и триинга.....	67
Глава 5	Физическое моделирование и опытные испытания подземного нагрева углей.....	81
5.1	Описание установки для физического моделирования подземного нагрева.....	81
5.2	Механизм роста проводящих дендритов при триинге.....	86
5.3	Моделирование нагрева подземного угольного пласта электрическим током в канале пробоя.....	92
5.4	Расчетные исследования нагрева подземного пласта.....	97

5.5	Испытания подземного нагрева углей на участке пласта	99
5.6	Методика подготовки площадки и проведения исследований.....	102
5.7	Электротепловой нагрев угольного пласта разреза «Богатырь».....	107
5.8	Технико-экономические расчетные показатели технологии.....	120
	Выводы.....	125
	Определения.....	126
	Сокращение и условные обозначения.....	127
	Список использованных источников.....	128
	Приложение А.....	137
	Приложение Б.....	142
	Приложение В.....	163
	Приложение Г.....	167
	Приложение Д.....	171
	Приложение Е.....	175

ВВЕДЕНИЕ

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, состоящий 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 пробоем 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 неконтролируемым, 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 пробое зависит от электрического сопротивления и теплопроводности углей, при протекание 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»: Ермағамбет Б.Т., Казанкапова М.К., Нурғалиев 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 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 0,5м 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) площадью 20 м^2 , 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 2500В осуществлялась через пульт управления. Был получен горючий газ с составом: H_2 – 73,2 %, CO -22,29 %, CH_4 -5,12 %, CO_2 - 4,49 %, N_2 -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 прилагаемого напряжения и тока, которые служат индикаторами начала триинга и электротеплового пробоя.

Методы исследования

Для изучения процессов пиролитической 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 оборудованиях, внесенные в Государственный реестр измерительных приборов.

Положения, выносимые на защиту

1. На основании приведенных опорных данных термохимических 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 Б₃, 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 Б₃.

3. На основании исследований электрофизических характеристик углей ($\epsilon, \sigma, \tan \delta$) 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 Б₃ 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 Б₃, 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 пиролитического разложения при подземном нагреве.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы были представлены на следующих 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 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 и экология Кузбасса Кемерово» (Россия, Кемерово, 7-10 октября 2019 г.), Международный Российско-Казахстанский Симпозиум «Углекислотная 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.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

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] (ВАК).

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., Зикирина 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] (ВАК).

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: Ермағамбет Б.Т., Бектурганов Н.С., **Касенова Ж.М.**, Реминный Р.А., Касенов Б.К., Нургалиев Н.У., Букетаев А.С., Зульхарнай Р.Н.

12. Патент Республики Казахстан на изобретение № 31990. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РК 17.03.2017. Способ комплексной переработки угля». Авторы: Ермағамбет Б.Т., **Касенова Ж.М.**, Нургалиев 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: Ермағамбет Б.Т., Мартемьянов С.М., **Касенова Ж.М.**, Бухаркин А.А., Нургалиев Н.У., Казанкапова М.К.

Научные публикации в прочих изданиях

14. **Касенова Ж.М.** Получение синтетического газа из угля/ Набиев М.А., Ермағамбет Б.Т., Нургалиев 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») /Ермағамбет Б.Т, Нургалиев 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 /Ермағамбет Б.Т., Касенов Б.К., Касенова Ж.М., Казанкапова М.К., Нургалиев 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., Ермағамбет Б.Т., Мартемьянов С.М., Нургалиев 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 /Ермағамбет Б.Т., Мартемьянов С.М., Юдин А.С., Касенова Ж.М. // Международный Российско-Казахстанский Симпозиум «Углекислотная 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 «Угলেখимия 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 Казахстанской национальной академии естественных наук и 25-летию Национального центра по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан» - 2019. -С.116-120.

23. **Касенова Ж.М.** Теплoемкость золы угля месторождения «Каражыра»/ Ермагамбет Б.Т., Касенов Б.К., Нургалиев Н.У., Касенова Ж.М., Сыздыкова А.А. // Международная научно-практическая конференция «Инновации в области естественных наук как основа экспортоориентированной индустриализации Казахстана», посвященной 10-летию Казахстанской 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 «Угলেখимия и экология Кузбасса», посвященного 300-летию Кузбасса, г.Кемерово. – 12-13 июля 2021г., - С.42

Монографии

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

Глава 1 Газификация твердых горючих ископаемых

1.1 История развития технологий процесса газификации угля

Газификация твердых горючих ископаемых (уголь, сланцы) представляет собой высокотемпературный термохимический процесс, при котором углерод топлива, взаимодействуя с кислородом (свободным или связанным), превращается в горючие газы (H_2 , CO , CH_4). Другими словами, при газификации угля, сланца происходит создание горючего (технологического) газа при неполном окислении органической массы угля.

Параллельно этому процессу протекают процессы терморазложения угольного вещества, в результате чего образующаяся газовая смесь содержит пары смолы и другие вещества. Сера топлива в процессе газификации преобразуется в газообразные сероводород и серооксид углерода.

Состав и теплотворная способность газа варьируются в зависимости от конструкции газогенератора, физико-химических свойств угля и состава дутья. В качестве окислителей, которые иногда называют газифицирующими агентами, применяют кислород (или обогащенный им воздух), водяной пар, диоксид углерода либо смеси указанных веществ [1-3]. Побочные продукты – балластные и вредные вещества (H_2O , CO_2 , N_2 , H_2S , NH_3 , смолистые вещества), шлак.

Синтетический газ используется как:

- энергетическое и технологическое топливо;
- синтез-газ, т.е. сырье для производства метанола, высших спиртов, жидких моторных топлив, аммиака и т.д.

Процесс газификации угля имеет давнюю историю с периодами бурного развития и спадами [4,5] и к настоящему времени разработаны кроме традиционных промышленно освоенных, более перспективные, такие как плазменные[6,7], каталитические, слоевая газификация с обращенным дутьем [8].

Впервые синтез газ из угля был получен англичанином Мэрдок в 1792 г., как попутный продукт при производстве «светильного масла». Его вначале XIX веке газ из угля использовали в бытовых целях – для отопления и освещения. В 1925 году Франц Фишер и Ганс Тропш запатентовали процесс производства синтетического жидкого топлива (СЖТ) из синтез-газа (смеси $CO+H_2$) на кобальтовом катализаторе [9]. В 30-50-е XIX века газификация угля получила широкое распространение во многих странах. Первые промышленные установки по производству СЖТ были построены в 1939-1942 годах в США, Франции и Нидерландах [10].

В Советском Союзе в начале войны на 1940 год насчитывалось более 200 газогенераторных станций [11]. На промышленных газогенераторных установках производили энергетический и технологический газы, синтез-газ для синтеза метанола и аммиака, водород, бытовой газ. Важно отметить, что все самые мощные газогенераторы были немецкого происхождения. Следует отметить, что в Германии нет собственной нефти, но имеются большие запасы угля. В 1920-1940 гг. в Германии была реализована беспрецедентная по масштабам программа переработки угля с производством жидких топлив, металлургического топлива, газов различного назначения и широкого ассортимента продуктов углехимии, включая пищевые продукты. В начале второй мировой войны в Германии действовало 9 промышленных установок по производству СЖТ методом Фишера-Тропша производительностью около 100 тыс. тонн в год каждая. С использованием жидких продуктов пиролиза, прямого и непрямого ожигения угля производилось около 5,5 млн. тонн в год моторных топлив [12]. Именно немецкие разработки того времени определили на многие десятилетия стратегию развития технологий переработки угля, в том числе газификации твердых топлив.

По результатам анализа конструктивных особенностей и принципов работы современных промышленных газогенераторов, следует выделить четыре основополагающих технических решений:

1. Создание Фрицем Винклером (концерн BASF) в 1926 г. газогенератора с кипящим слоем. Эта разработка послужила основой для современных действий HTW (Hoch-Temperatur Winkler) и KRW (Kellogg-Rust-Westinghouse) и других.

2. Разработка компанией «Лурги» в 1932 г. Слоевого газогенератора, работающего под давлением 3 Мпа. Внедрение повышенного давления для интенсификации процесса газификации реализовано практически во всех современных промышленных газогенераторах.

3. Разработка Генрихом Копперсом и Фридрихом Тотцеком в 1944-45 гг. пылеугольного газогенератора с жидким шлакоудалением. Первый промышленный аппарат этого типа был построен в 1952 г. в Финляндии. Пылеугольный принцип газификации с жидким шлакоудалением реализован в промышленных аппаратах Destec, Shell, Prenflo, разработанных на базе газогенератора Коппер18И-Тотцека, в аппарате Техасо и других. Удаление шлака в жидком виде реализовано в слоевом газогенераторе BGL (British Gas – Lurgy), разработанном на базе газогенератора Лурги.

4. Разработка компанией Техасо в 1950-е годы газификаторов для переработки тяжелых нефтяных остатков. Всего построено более 160 таковых установок. В 1970-е годы была разработана модификация аппарата Техасо для газификации водоугольной суспензии. Принцип подачи угля в аппарат в виде водоугольной суспензии использован и в газогенераторе Destec [13].

К 50-м годам фактически во всех больших и средних городах Европы и Северной Америки действовали газовые фабрики для производства отопительного, бытового и светильного Таза. Это был «золотой век» газификации угля. В 1958 году в СССР на 350 газогенераторных станциях (около 2500 газогенераторов) перерабатывалось более 20 млн. тон угля в год [14].

В 60-е годы, в связи с быстрым ростом добычи нефти и природного газа, производство газа из угля в России и других странах было сведено к минимуму, так как газ и СЖТ из угля оказались неконкурентоспособными аналогам из природного газа и нефтепродуктам. В начале 1960-х годов разработка месторождений дешевой нефти на Ближнем Востоке и в Западной Сибири привела фактически к полной ликвидации данной отрасли индустрии [15].

Производство СЖТ получило развитие в ЮАР вследствие экономической изоляции (эмбарго на поставку нефти), поскольку своей нефти в стране нет. В 1956, 1980, 1982 годах были запущены в эксплуатацию три завода (SASOL I, II и III) общей мощностью 90 тыс. тонн угля в сутки [16]. Всего эксплуатируется 88 газогенераторов Лурги. После снятия эмбарго производство СЖТ сократили на 60 % и переориентировали на выпуск лаков, красок, пластмасс, олефинов и других продуктов органического синтеза.

В мировой практике интерес к переработке угля способом газификации резко возрос после экономического кризиса 1972 года. В разное время действовало более 800 газогенераторов, в том числе более 30 газогенераторов «Лурги» с единичной мощностью по углю до 45 тонн/ч. После 1977 г. введено в эксплуатацию еще 130 газогенераторов «Лурги», а также газогенераторов Винклера с кипящим слоем количеством более 40 аппаратов с единичной мощностью до 35 тонн/ч по углю. Пылеугольных газогенераторов Копперса-Тотцека к началу 1970-х годов эксплуатировалось более 50 аппаратов с единичной мощностью до 28 тонн/час по углю [17].

В 70-80-е годы в США, Германии, Японии, Великобритании начали разработку и опытно-промышленное освоение технологий газификации, ориентированных на производство газа для синтеза СЖТ и органических продуктов. К 1985 г. ряд технологических процессов был отработан в крупном масштабе (30-100 т угля в час), и на основе этих технологий считается возможным в течение пяти лет развернуть промышленное производство [18]. В США, Великобритании, Германии, стране восходящего солнца, бывшем СССР и ряде остальных государств при государственной поддержке были начаты масштабные программы сотворения технологий углепереработки. К 1980-м годам были сооружены десятки демо и пилотных установок для газификации, ожижения и термической переработки угля. В России отработка новых технологических процессов газификации угля не вышла за рамки стендовых испытаний [19].

В середине 80-х годов большинство из этих работ было приостановлено, так как цены на нефть и природный газ стабилизировались. Однако, к примеру, в ряде регионов, где природного газа нет либо не достаточно (Северная Америка, Китай и др.), внедрение газа из угля для синтеза метанола и аммиака экономически оправдано и построен ряд промышленных компаний [20]. В начале 90-х бурное развитие получила внутрицикловая газификация для производства электроэнергии, внедрение бинарного цикла производства, при котором горючий газ утилизируется в газовой турбине, а продукты сгорания используются при генерации пара для паровой турбины [21]. Анализ динамики развития технологий газификации показывает, что наиболее перспективны две области использования газа: внутрицикловая газификация и химическое производство (главным образом синтез аммиака). Многие газогенераторы, разработанные для производства синтез-газа, успешно применяются в энергетике. ТЭС с внутрицикловой газификацией (IGCC – Integrated Gasification-Combined Cycle, ПТУ – парогазовая установка) позволяет существенно снизить удельные выбросы вредных веществ и повысить электрический КПД энергоблока с 32-35 до 46 %, а в перспективе – до 50 % [22]. В теплоэнергетике данное направление считается одним из самых перспективных [23].

Первая коммерческая электростанция с внутрицикловой газификацией – Cool Water, США, штат Калифорния, мощностью 100 МВт (60 т/ч по углю) была построена в 1983 г. Употреблялся генератор Техасо с подачей топлива в виде водо-угольной суспензии. В различных странах было введено в эксплуатацию 18 электростанций с внутри цикловой газификацией твердого топлива мощностью от 60 до 300 МВт [24]. Завышенный энтузиазм к внутрицикловой газификации угля в развитых странах разъясняется двумя причинами. Во-первых, ТЭС с внутрицикловой газификацией экологически менее опасна. Благодаря предварительной очистке газа сокращаются выбросы оксидов серы, азота и жестких частиц. Во-вторых, внедрение бинарного цикла позволяет значительно увеличить КПД электростанции и, следовательно, уменьшить удельный расход топлива [25].

Таблица 1.1 – Величина удельных выбросов и КПД для ТЭС с внутрицикловой газификацией и традиционным сжиганием угля

Характеристики	Обычная угольная ТЭС	ТЭС с внутрицикловой газификацией
Концентрация вредных веществ в дымовых газах(для угольной ТЭС –согласно Евростандарту), мг/м ³ - Sox-Nox- Твердые частицы	13015016	103010
Электрический КПД, %	33-35	42-46

Также следует отметить, что удельные капитальные издержки при использовании внутрицикловой газификации составляют приблизительно 1500 долл. США за 1 кВт с перспективой понижения до 1000-1200 долл. США, в то время как для традиционной угольной ТЭС удельные капитальные издержки составляют приблизительно 800-900 долл. США за 1 кВт [26]. ТЭС с внутрицикловой газификацией твердого топлива более привлекательна при наличии экологических ограничений в месте размещения и при использовании довольно драгоценного топлива, так как расход топлива на 1 кВт сокращается. Эти условия характерны для развитых государств. В настоящее время внедрение внутрицикловой газификации твердого топлива считается одним из перспективным направлением в энергетике. Одна из первых промышленных установок по применению генераторного газа в прямом восстановлении железа, была запущена в эксплуатацию в мае 1999 года в ЮАР (Saldanha Steel, Кейптаун), еще одна – в Южной Корее [27].

Современное состояние процесса газификации угля

Авторами работы [28] проведено сравнение энергетической и экономической эффективности ПГУ с газификацией угля при низком и высоком уровнях температур на основе математического моделирования технологий газификации. Все технологии газификации могут быть разделены на низкотемпературные с ТШУ и высокотемпературные с ЖШУ. У первых температура процесса газификации угля лежит в диапазоне 850-1000 °С, а у вторых – в диапазоне 1300-1500 °С. Выполненные исследования показали, что ПГУ с низкотемпературной газификацией угля имеют более высокий максимально возможный КПД нетто (51%), чем ПГУ с высокотемпературной газификацией. При одинаковых значениях КПД нетто во всем целесообразном диапазоне его изменения ПГУ с ТШУ имеют меньшие капиталовложения, чем ПГУ с ЖШУ. Таким образом, для парогазовых энергетических установок достаточно большой единичной мощности, порядка нескольких сотен МВт, использование технологии низкотемпературной газификации угля более перспективно.

В работе [29] проведена совместная газификация смеси (в %) 60 угля, 20 сосны и 20 отходов полиэтилена. В результате установлено, повышение температуры с 750 до 890 °С привело к снижению выхода CH_4 на 30 % и других углеводородов на 63%. При этом выход водорода увеличился на 70 %.

В 60-70-х годах был разработан способ получения синтез-газа из водоугольной суспензии (ВУС) [30], включающий подготовку и газификацию водоугольной суспензии. Главное отличие данного метода от существующих, заключается в том, что газификацию водоугольной суспензии осуществляют в две стадии: первую ведут в вертикальном противоточном трубчатом теплообменнике газификационной колонны, вторую стадию – в реакторе нагрева сверхвысоких частот (СВЧ-реакторе). Подготовка водоугольной суспензии

осуществляют путем диспергирования угля в водной фазе до размеров частиц твердой фазы 10-30 мкм, с массовой концентрацией органической части угля в водоугольной суспензии 32-48%, на первой стадии газификации полученную водоугольную суспензию под давлением 0,5-10 Мпа направляют в теплообменник газификационной колонны, где ее нагревают до температуры 800-1000 °К до образования парогазоугольной взвеси, которую направляют в пароструйную мельницу для доизмельчения частиц твердой фазы до тонкодисперсного состояния с размером частиц угля менее 1-3 мкм, далее измельченную до заданной крупности парогазоугольную взвесь подают на вторую стадию газификации в реактор нагрева сверхвысоких частот (СВЧ-реактор), где ее нагревают до 1000-1800 °К до получения синтез-газа. Полученный синтез-газ охлаждают в теплообменнике газификационной колонны с помощью водоугольной суспензии и очищают от балластированных веществ с помощью воды, которую используют для получения водоугольной суспензии.

В Китае проведены исследования газификации каменных углей разной стадии метаморфизма с различным содержанием частиц крупностью 0,3-0,4; 0,4-0,6; 0,6-0,8 и 0,8-1,0 мм [31]. Газификацию проводили в опытном газогенераторе на дутье из пара и воздуха. Установлено изменение отдельных компонентов генераторного газа (CO , H_2 , CH_4). Отмечено снижение калорийности генераторного газа с повышением степени газификации.

Авторами работы [32] исследована газификация угля Yangquan с зольностью 26,7 и содержанием нелетучего C 55,39 (в воздушно-сухом состоянии). Газификацию проводили в слое диаметром 28 мм на паровоздушном дутье в присутствии катализаторов – гидроокисей Na в твердом состоянии или жидких отходов вязкого волокна. Определен кажущийся порядок реакции. При введении 6% твердого катализатора получен газ с 34,26 % H_2 и 16,49% CO ; при эквивалентном введении жидкого катализатора – с 33,31% H_2 и 21,9% CO .

В работе [33] проведено сопоставление скоростей газификации коксов при использовании сублимированных гидроксидов щелочных металлов. Каталитический эффект гидроксидов металлов, как и общий выход газа, возрастает в ряду: натрий<литий<калий. Соответствующие этим опытам значения скоростей перехода углерода в газовую фазу составили (10^{-2} г/мин): 8,25; 8,77 и 8,91. Использование гидроксида калия в качестве катализатора паровой газификации кокса при выбранных условиях вызывает увеличение скорости процесса на 29%, по сравнению с экспериментом без катализатора (0,069 г/мин). Каталитический эффект достигается при содержании паров KOH в водяном паре 0,37 %. Содержание калия в остатке газификации составило 0,48% (в исходном коксе $2,5 \cdot 10^{-3}$ %).

В работе [34] газификацию мелкодисперсного угля проводили в опытном газогенераторе на дутье из пара и воздуха. Установлено изменение отдельных компонентов генераторного газа

(CO, H₂, CH₄). Отмечено снижение калорийности генераторного газа с повышением степени газификации.

Рассмотрено использование струи высокотемпературной плазмы для газификации горючих сланцев [35]. В установке производительностью 20-50 кг/час использовали 2 плазматрона мощностью 50-110 кВт. Степень газификации сланцев на этой установке до 98%, степень десульфуризации продуктов пиролиза до 90%, содержание CO+H₂ в продуктах пиролиза 50-80 %, выход CO+H₂ 0,5-1,9 м³/кг. Из сланцев извлекается 40-60% содержащихся Ru, V, Mo и редкоземельных элементов и 80% U. Эффективность переработки плазмохимическим способом в 1,5 выше, чем при газификации действием O₂/водяной пар.

Проведена работа по газификации угля и природного газа [36]. При исследовании в реакторе, моделирующем печь для получения синтез-газа показано, что в нижней зоне, близкой к днищу печи и вводу кислорода, происходит одновременное окисление природного газа и угля. Пиролиз CH₄ и восстановление CO₂ и пара идет при подъеме синтез-газа, а равновесное состояние системы наступает в момент удаления синтез-газа из реактора.

Среди всех известных технологий газификации углей наибольшее распространение получил процесс газификации угля в плотном слое. Из процессов газификации в плотном слое наиболее отработанной и надежной в эксплуатации является схема газификации в плотном слое под давлением – процесс Лурги (Lurgi). В работе [37] приведены основные технологические характеристики процесса газификации углей Шубаркольского месторождения, которая проводилась на газификаторе Лурги. Авторы Загруднинов Р.Ш., Нагорнов Н.А. подробно рассмотрели газификацию Шубаркольского угля в паравоздушной и парокислородной среде.

В мировой практике эксплуатации газогенераторов Лурги газификация угля с зольностью, не превышающей $A^d = 3,5-3,7$ %, не имела место. Как правило, газифицировались каменные и бурые угли с зольностью на сухую массу не менее $A^d = 10-12$ %. Связано это с тем, что низкая зольность исследуемого топлива является фактором, ограничивающим его применение при газификации в плотном слое. Малая зольность является причиной низкой скорости образования зольной подушки [38].

В 2005-2007 гг в Казахстане на предприятии АО «Алюминий Казахстан», для обжига гидрооксида алюминия, использовали синтез газ, который производился в газогенераторах Лурги под давлением, газифицировался каменный уголь Шубаркольского месторождения, марки Д. При этом расчётный расход угля на одном газогенераторе составляет 6,25 т/час. Особенностью выбора топлива для газификации являлось то обстоятельство, что Заказчиком было предложено применить низкозольный уголь, используемый в технологии завода при обжиге гидрооксида алюминия. В процессе анализа результатов экспериментов не учитывалось,

что изменение удельного потребления кислорода автоматически вызывает изменение удельного потребления пара, если природа газифицируемого угля и золы требует сохранения постоянных величин показателей газификации (газификационного отношения). В настоящее время, данное производство не функционирует из-за влияния на окружающую среду

1.2 Обзор технологии подземной газификации углей электрофизическим способом

Подземная конверсия твердых топлив в горючие газы и синтетическую нефть давно привлекает внимание исследований. Актуальность этой проблемы со временем нарастает в связи с неотвратимым истощением легкоизвлекаемых углеводородов. В настоящее время видится наиболее вероятным, что их придется заменять менее удобные для использования низкосортные ископаемые топлива, такие как каменные и бурые угли, сапропелиты и горючие сланцы. В связи с этим, внимание многих исследователей привлекает вопрос: как, применяя современные технологические достижения, сделать возможной добычу и использование трудноизвлекаемых органических топлив. Проанализируем предлагаемые технологии и способы внутрипластовой разработки твердых топлив.

Одна из проблем исследования нетрадиционных источников углеводородов состоит в отсутствии точных оценок их запасов. Методы геологического моделирования не позволяют получить конкретных сведений, поскольку месторождения нетрадиционных углеводородных ресурсов резко отличаются друг от друга. К примеру, глубина залегания и петрофизические свойства горных пород, содержащих сланцевый газ, различаются для разных регионов и месторождений. Из этого следует, например, что успешный опыт США в области добычи сланцевого газа не удастся повторить в других странах [39].

Метан угольных пластов

Один из перспективных источников нетрадиционных углеводородов – метан угольных пластов. Большинство месторождений каменного угля являются, строго говоря, газоугольными. Метаноносность залежей достигает 40-50 м³/т и возрастает с увеличением глубины залегания [40].

Метан угольных пластов содержится в адсорбированном, абсорбированном и свободном состояниях. Некоторая часть метана также растворена в пластовых водах. Распространено мнение, что стабильная добыча метана возможна только из его скоплений в свободном состоянии. Существующая технология разработки метана газоносных угольных пластов направлена не столько на промышленную добычу газа, сколько на обеспечение безопасности шахтных работ. Технология основана на бурении скважин с земной поверхности и из шахтных выработок с последующим осуществлением гидроразрыва пласта. Вскрытые растрескиванием

массивы угля при этом имеют некоторую поверхность фильтрации, с которых к скважине поступают притоки угольного метана. С целью дальнейшей интенсификации метаноотдачи применяют способы физико-химической обработки созданных щелей гидравлического разрыва. В качестве реагентов применяют химически активные растворы (кислоты и пр.) и поверхностно-активные вещества [41].

Большая часть угольного метана содержится в сорбированном состоянии. Задача его извлечения сводится к решению двух проблем: тщательное разупрочнение угленосной толщи с образованием большого количества трещин и разрушение стойкой физико-химической связи между молекулами метана и угольного вещества.

Решения первой проблемы достигают за счет механической активации. Наиболее распространенным здесь является метод гидравлического разрыва пласта (рисунок 1.1). Впервые методы гидравлического и пневматического разрыва пласта были разработаны и применены в Советском Союзе в 50-х годах прошлого столетия [42,43]. Растрескивание пород толщи начинается с давления ~ 8 МПа, современный уровень развития техники позволяет производить гидроудар до давления 30-50 МПа. Газодинамические и кавитационные способы также могут применяться для интенсификации газоотдачи, однако в настоящее время не нашли широкого распространения.

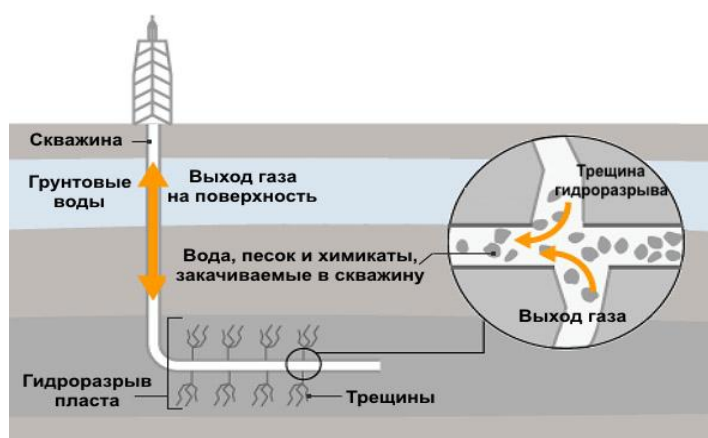


Рисунок 1.1 – Современный метод гидроразрыва пласта

Увеличение площади вскрытой поверхности угольного пласта также возможно с помощью технологий направленного и горизонтального бурения [44]. Использование протяженных направленных буровых каналов создает площадь поверхности, соизмеримую с площадью трещин гидравлического разрыва пласта [45]. От одного вертикального участка скважинного ствола могут отходить множество горизонтальных участков, формируя в толще пласта так называемый скважинный «куст». Современные буровые технологии позволяют производить гидроразрыв ступенчато и по отдельности на разных участках скважины. Для

этого остальные участки нейтрализуются с помощью скважинных надувных пробок, называемых «пакерами» [46].



Рисунок 1.2 – Надувная скважинная пробка - пакер

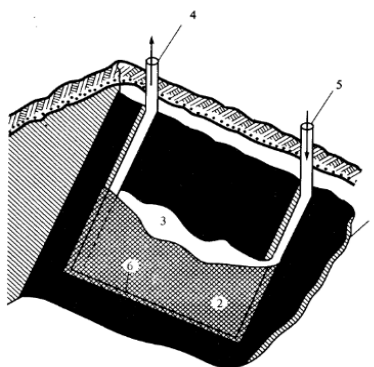
Для решения проблемы десорбирования метана также применяют несколько способов. Так, эффективным средством повышения газоотдачи пласта является закачка углекислоты. Высвобождение метана при этом происходит за счет сорбционного замещения. Исследования показали, что углекислота замещает метан в соотношении 2:1. Однако в этом случае возникает проблема разделения получаемой газовой смеси [47]. Традиционно же для этой цели использовались химически-активные вещества. С приобретением популярности так называемым «сланцевым газом», многие производители направили усилия на создание состава для гидравлического разрыва пласта, который одновременно выполняет функцию химического активатора десорбции метана. Больших успехов в этом достигли корпорации Schlumberger, Halliburton, Royal Dutch Shell plc и пр. Современные составы для гидравлического разрыва пласта представляют собой гелеобразные жидкости на водной основе. Десорбирующим компонентом в них являются поверхностно-активные вещества, химический состав которых охраняется в режиме коммерческой тайны. Концентрация этих веществ составляет менее процента, что, по заявлению производителей, является экологически безопасным. В настоящее время эти составы активно применяются для добычи сланцевого газа на месторождении Грин Ривер (США), месторождениях горючих сланцев в Африке, Восточной Европе (Польша, Украина) [48-51].

Суммарный объем добычи метана угольных пластов в мире на 2010 г. составлял 68 млрд м^3 , из них: США – 54,0 млрд м^3 ; Канада – 7,5 млрд м^3 ; Австралия – 5,2 млрд м^3 ; Китай – 1,4 млрд м^3 . По оценкам ведущих американских экспертов, мировая добыча метана из угольных пластов в 2020 г. составило 78 млрд м^3 , а к 2040 г. достигнет 157 млрд м^3 в год [52].

Разработка таким способом месторождений твердых горючих ископаемых не является конверсией в полном смысле. С помощью гидроразрыва удастся добывать сорбированный в породе горючий газ, а также растворять вязкие жидкие компоненты, получая нефтеподобные продукты. Однако энергетический потенциал твердой горючей составляющей – а это более половины калорийности породы – при этом не извлекается из пласта. Кроме того, остающаяся в пласте твердая масса остается пропитанной жидкостью-агентом гидроразрыва. Во-первых, это создает опасность попадания в дальнейшем этой жидкости в грунтовые воды, а во-вторых, затрудняет возможную дальнейшую добычу оставшейся породы. Таким образом, при современном уровне техники дегазация угольных и сланцевых пластов является приемлемым способом использования месторождений твердых топлив, однако далеким от технологического совершенства. Целесообразно искать пути более комплексного освоения горючих ископаемых.

Газификация углей неполным окислением

Еще одним перспективным способом нетрадиционного использования месторождений твердых топлив является газификация неполным окислением. Этот подход заключается в подаче газообразного окислителя в подземный пласт и создании в нем очага горения (рисунок 1.2). В качестве окислителей используют воздух, кислород, водяной пар, паровоздушную смесь, парокислородную смесь. В результате окислительных химических реакций образуется газовая смесь, содержащая такие горючие компоненты, как водород, монооксид углерода, метан [53]. Впервые в СССР этот способ был запатентован в 1930 г [54].



1 – угольный пласт, 2 – шлак и обрушившаяся порода кровли, 3 – огневой забой, 4 – газоотводящая скважина, 5 – дутьевая скважина, 6 – начальный огневой штретк

Рисунок 1.3 – Схема подземного дутьевого газогенератора

Такая технология подземной газификации не требует существенных затрат на подготовку, а также не предъявляет жестких требований к ландшафту земной поверхности[55]. Состав и теплота сгорания получаемого газа зависят от качества угля, геологических условия его залегания (например, наличия грунтовых вод) и от состава подаваемого дутья (таблица 1.3).

Калорийность газа на воздушном дутье может достигать 4,5 МДж/м³. При обогащении дутья кислородом калорийность газа возрастает и может достигать 7 МДж/м³. Современные методы моделирования и расчета состава и интенсивности дутья позволили увеличить теплоту сгорания газа до 9 МДж/м³ [56-58].

Таблица 1.2 – Примерный состав газа, получаемый при дутьевой газификации на Южно-Абинской станции «Подземгаз»

Компонент	Концентрация, % об.	
	Воздушное дутье благоприятные условия / неблагоприятные условия	Парокислородное дутье
1	2	3
CO ₂	4,6/13,0	28,03
CO	27,3/12,4	20,2
CH ₄	1,8/2,15	11,13
H ₂	10,1/12,2	38,94
C ₂ H ₄	-	0,4
C ₂ H ₆	0,1/0,7	0,61
N ₂ +O ₂	56,2/59,5	0,29
H ₂ S	0,01/0,05	0,4

В настоящее время в переработке твердых топлив, привлекают внимания технологии с возможностью превращения угля непосредственно на месте его залегания (под землей) в более экологически чистые газообразные энергоносители. К такой нетрадиционной технологии разработки угольных пластов следует отнести их подземную газификацию. Подземная газификация угля (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). ПГУ в России насчитывает более чем полувековой период практической и научной разработки. К данному 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. По технологии предусматривается использование воздуха, обогащенного кислородом (40-60%), и технического кислорода (95-98%). Это позволяет повысить теплоту сгорания газа до 9-11 МДж/м³ и

существенно расширить сферу его применения. Однако окончательный состав применяемого дутья может быть принят в конкретных местных условиях на основе технико-экономической оценки с учетом предполагаемой сферы использования газа подземной газификации (ПГУ) [58]. Приведенные данные в ценах до 1990 г., дают четкое представление об экономических возможностях предприятий ПГУ небольшой производительностью (50-100 у.т./год) и работающих на воздушном дутье. Необходимость действующих предприятий Ангренская (Узбекистан) и Южно-Абинская станции «Подземгаз» (Россия) по данной технологии заключалось в том, чтобы непрерывно снабжали газом ПГУ близлежащие промышленные предприятия [59]. Несмотря на значительные успехи в области дутьевой подземной газификации угля, стремительного внедрения этих технологий в массовое использование не наблюдается. Судя по всему, это обусловлено экономическими аспектами структуры теплоэнергетического комплекса. Отдельные случаи внедрения дутьевой газификации в производство встречаются для круто падающих пластов, а также для месторождений бурых углей, нерентабельных для разработки шахтным способом.

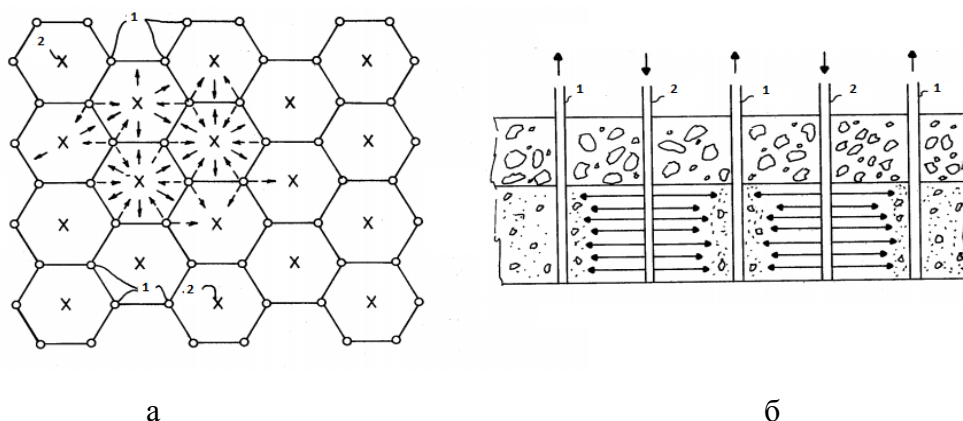
В США были разработаны некоторые вариации дутьевой подземной газификации и прошли экспериментальные испытания на сланцевом месторождении «Грин Ривер». Согласно проводимым на месте экспериментальным испытаниям сланцы сначала дробили, и потом сжигание проводили при помощи нагнетания воздуха. Для эффективного охвата сжиганием главным условием является обеспечение раздробленного слоя, имеющего, единообразный размер дробления и единообразное распределение незаполненного продуктом пространства пласта. Размер дробления составлял порядка нескольких дюймов. Дробление осуществлялось с помощью взрывчатых веществ, закладываемых на забой скважины. Авторы отмечают, что проведенные полевые испытания обеспечивали ограниченную зону досягания зоны горения от ствола скважины [60].

Подземная газификация твердых топлив неполным окислением является наиболее отработанной технологией внутрипластовой конверсии. Ее широкому внедрению препятствует ряд ограничений. Во-первых, относительно низкая теплотворная способность получаемого газа не позволяет применять его в газопоршневых двигателях для непосредственной генерации электрической или механической энергии. В результате, получаемый газ используется, в основном, в технологических целях. Некоторого повышения теплотворной способности можно добиться, используя парокислородное дутье, однако этот способ неоправданно удорожает товарный газ. Ко второму ограничению дутьевой газификации можно отнести невозможность освоения месторождений низкокачественных топлив, имеющих высокую зольность и низкую теплотворную способность. Наиболее пригодными для газификации являются мощные угольные пласты с невысокой общей зольностью и небольшими прослойками минеральной

породы. Как правило, однако, такие месторождения пригодны для добычи традиционными способами.

Методы теплопроводного нагрева

В 80-х годах запатентован ряд методов теплопроводного нагрева подземных пластов от стволов скважин [61,62]. Методы заключаются в нагревании непроницаемых твердых топлив нагревающими скважинами (до 600°C) с интервалом между скважинами свыше 6 м (рисунок 1.4).



вид сверху (а) и профильный вид (б): 1 – продуктивные скважины, 2 – нагревающие скважины

Рисунок 1.4 – Схема метода теплопроводного нагрева

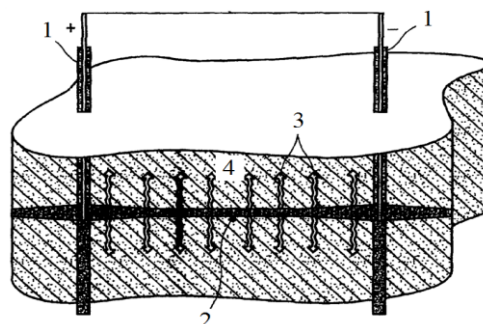
Согласно этому техническому решению, скважины можно нагревать либо электрическими резистивными нагревателями, либо газовыми нагревателями. Авторы провели полевые испытания на обнажающемся сланцевом пласте в скважинах глубиной (6–12) м с интервалом между скважинами 0,6 м. После трех месяцев температура в испытательном участке достигла 300°C . Показатели дебита нефти согласно пробе Фишера составили 90%. Авторы отметили, что проницаемость повышалась между скважинами, и они полагают, что это может быть обусловлено горизонтальными разрывами, сформированными объемным расширением вследствие реакций конверсии керогена в углеводороды. Поскольку теплопроводное нагревание ограничено расстояниями в несколько метров, теплопроводное нагревание из стволов скважин нужно создавать в очень тесно расположенных друг к другу скважинах. Это обстоятельство ограничивает экономическую применимость способа для твердых топлив очень малой глубины залегания.

Электрический резистивный нагрев подземных пластов

Техническая возможность проведения резистивного нагрева в подземном пласте продемонстрирована в экспериментальном испытании с тяжелой нефтью, в котором

«электрический предварительный нагрев» был использован для пропускания электрического тока между двумя скважинами в целях уменьшения вязкости и создания каналов сообщения между скважинами для совместного следования с потоком водяного пара. Нагрев сопротивлением в подземном пласте запатентован и применен в промышленном масштабе при помощи метода пропускания переменного тока или радиочастотной электроэнергии между расположенными друг над другом проводящими разрывами или электродами в одной и той же скважине [63-66]. В документе [67] описывается нагрев сопротивлением в пласте путем пропускания переменного тока между разными скважинами. Другие работы описывают способы создания эффективного электрода в стволе скважины [68,69]. Документ [68] описывает способ, согласно которому электрический ток проходит по разрыву, соединяющему две скважины для начала протекания тока в толще окружающего пласта, при этом пласт нагревается в первую очередь в связи с объемным электрическим сопротивлением пласта.

Согласно способу, описанному в [70], скважины соединяют с помощью гидроразрыва, а образовавшуюся полость заполняют электропроводящим материалом (рисунок 1.5). Для нагрева используют электрический ток, протекающий по электропроводящему наполнителю 2, тепло 3 при этом распространяется по пласту. Напряжение прикладывают к электродам, расположенным в скважинах 1 на уровне гидроразрыва.



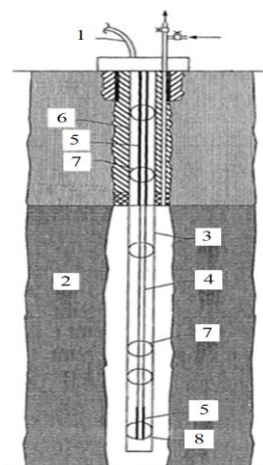
1 – электродная система, 2 – гидравлический разрыв, 3 – распространение тепла, 4 – пласт твердого топлива

Рисунок 1.5 – Схема метода электрорезистивного нагрева

Авторами указано, что предпочтительным является переменное напряжение, так как переменный ток легче генерировать, и он сводит к минимуму электрохимическую коррозию, в противоположность постоянному напряжению. Но для данного изобретения может применяться любая форма электрической энергии. Расклиненный разрыв 2 действует как нагревающий элемент, проходящий по нему электрический ток, генерирует тепло 3 за счет

нагрева сопротивлением. Тепло 3 передается за счет теплопроводности в породу 4, имеющую значительное содержание органических веществ. В результате этого порода нагревается в достаточной степени, чтобы преобразовать твердое органическое вещество в жидкие углеводороды. Сформированные углеводороды затем добывают известными способами. В качестве электропроводного расклинивающего наполнителя можно использовать любые подходящие материалы. Электрическое удельное сопротивление слоя расклинивающего наполнителя, который предположительно будет подвергаться воздействию напряжений, должно являться достаточно высоким, чтобы обеспечивать нагрев сопротивлением, и при этом достаточно низким, чтобы проводить электрический ток от одной скважины к другой. Материал расклинивающего наполнителя также должен соответствовать обычным критериям расклинивающих наполнителей, т.е. он должен обладать достаточной прочностью, чтобы удерживать разрыв в раскрытом положении, и иметь достаточную плотность для его закачки в разрыв. Три соответствующих класса расклинивающего наполнителя включают песок с тонким металлическим покрытием, композитные металлокерамические материалы, материалы на основе углерода, либо проводящие цементы. В частности, в качестве расклинивающего наполнителя можно использовать зеленый или черный карбид кремния, карбид бора или прокаленный нефтяной кокс. От электропроводного материала не требуется, чтобы он был однородным, и он может представлять собой смесь двух или более соответствующих электропроводных материалов.

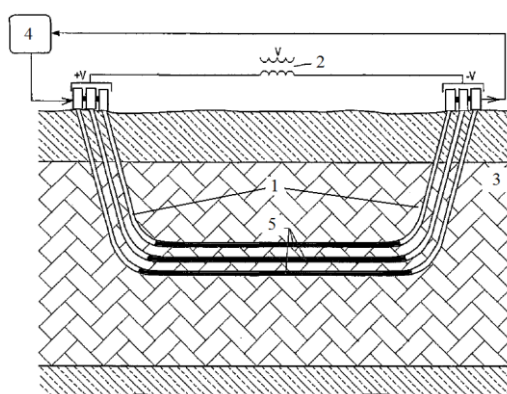
На рисунке 1.6 представлен вариант способа нагрева подземного пласта нагревательной системой типа «проводник в трубе» [71]. Проводник 4 расположен в трубе 3. Проводник представляет собой стержень или трубу из электропроводящего материала. На обоих концах проводника имеются участки 5 с низким сопротивлением для того, чтобы в этих участках выделялось меньше джоулева тепла. Участок с низким сопротивлением образуется за счет того, что проводник в этой секции имеет большую площадь поперечного сечения, или эти участки выполнены из материала, имеющего пониженное сопротивление. Труба 3 выполнена из электропроводящего материала и располагается в пласте 2. Скважина имеет диаметр, соответствующий трубе 3. Проводник может быть расположен в центре трубы с помощью центрирующих элементов 7. Центрирующие элементы выполнены из керамического материала или смеси керамических материалов. Центрирующие элементы разнесены вдоль проводника с интервалами (0,1–3) м. Второй участок проводника 4 с низким сопротивлением может соединять проводник с устьем скважины. Электрический ток подводится в проводник 4 по силовому кабелю 1. Ток из проводника проходит через скользящий соединитель 8 в трубу 3. Труба 3 может быть электрически изолирована от обсадной трубы 6. Тепло выделяется в проводнике 4 и трубе 3 при этом нагревает пласт твердого топлива 2.



1 – силовой кабель, 2 – пласт, 3 – труба, 4 – проводник, 5 – участки низкого сопротивления, 6 – обсадная колонна, 7 – центрирующие кольца, 8 – соединитель

Рисунок 1.6 – Нагревательная система типа «проводник в трубе»

На рисунке 1.7 показан вид сбоку одного из вариантов осуществления системы для нагрева подземного пласта твердого топлива с использованием циркуляции текучей среды и электронагрева [72].



1 – трубы, 2 – трансформатор, 3 – пласт твердого топлива, 4 – источник тепла, 5 – нагревательные элементы.

Рисунок 1.7 – Комбинированный нагрев

Для создания U-образного нагревателя в скважинный ствол помещают систему трубопроводов. Устья нагревателей 5 могут быть соединены трубопроводами с системой циркуляции теплопереносящей текучей среды 4. Также нагревательные трубы соединены с системой подачи электроэнергии 2. В этом случае нагрев пласта 3 происходит за счет теплопереносящей текучей среды и электрической энергии. Система подачи электроэнергии включает в себя трансформатор и соединительные кабели.

В качестве теплопереносящей среды в системе с замкнутым контуром может быть использован газ под высоким давлением. В некоторых вариантах теплопереносящей средой является диоксид углерода. Могут быть также использованы и другие текучие среды, такие как водяной пар, воздух, гелий или азот. Давление текучей среды, поступающей в нагревательные трубы, может составлять 3 МПа или выше.

На ранних стадиях нагрева неизолированный нагревательный элемент может допускать некоторую утечку тока к воде или другим жидкостям, которые являются электропроводящими в пласте, в результате чего нагревается сам пласт. После удаления воды или других электропроводящих материалов из ствола скважины нагревательные элементы становятся электрически изолированными от пласта. Позднее, когда из пласта удаляется вода, этот пласт приобретает ещё большее электрическое сопротивление, и нагревание пласта происходит ещё в большей степени за счет передачи тепла теплопроводностью и излучением.

Идея резистивного нагрева появилась, как продолжение идеи теплопроводного нагрева с целью увеличить объем прогреваемой породы. Из-за низкой теплопроводности твердых топлив, выделение тепла в некотором нагревательном элементе, помещенном в пласт, требует большого времени нагрева. Для того, чтобы достигнуть температуры пиролиза в точке, удаленной от нагревателя на 2 метра, требуется несколько месяцев поддерживать нагрев. Резистивный нагрев частично повышает эффективность конверсии за счет того, что источник тепла распределен внутри пласта.

Однако наибольшего эффекта можно добиться, выделяя тепло не в нагревательном элементе, а непосредственно в породе. Этого можно достигнуть, пропуская электрический ток непосредственно через уголь и выделяя в нем тепло, определяемое законом Джоуля-Ленца.

1.3 Физико-химические основы процесса термического разложения угля

При термическом разложении твердых горючих ископаемых происходит превращение органической части топлива в горючий газ при высокотемпературном нагреве (700-1200 °C). Основными компонентами горючего газа являются CO, H₂ и CH₄. Газ также содержит некоторое количество CO₂, H₂O, а при использовании воздуха N₂. Из-за наличия в угле гетероатомов, прежде всего S и N, образуются H₂S и NO₂ [73].

Скорость реакций неполного окисления твердых топлив существенно зависит от температуры, которая при отсутствии катализатора должна быть выше 800-900 °C. При окислении твердого топлива чистым O₂ в адиабатном режиме температура была бы слишком высокой, поэтому в качестве газифицирующего агента (дутья) обычно используют воздух, водяной пар, паровоздушную или парокислородную смесь [74].

В зависимости от вида дутья получают следующие разновидности генераторного газа: воздушный, водяной, смешанный, парокислородный и др. Наибольшее промышленное применение имеет смешанный газ, получающийся при газификации топлива на паровоздушном дутье. Изменяя состав дутья (в частности, соотношение водяного пара и O_2) и его начальную температуру с учетом потерь тепла в самом газогенераторе, можно обеспечить желаемую температуру, которую, как и давление, устанавливают обычно исходя из технологических соображений (в зависимости от способа удаления шлаков и т.д.). С ростом давления в продуктах газификации твердых топлив увеличивается концентрация CH_4 [75].

В процессе газификации угля воздушным или паровоздушным дутьем, полученный газ содержит много N_2 и имеет теплоту сгорания около 4 МДж/м^3 . Он служит топливом в котлах электростанций, технологических топках, отопительных котельных установках; транспортировка его на большие расстояния нерентабельна [76-78]. В случае парокислородной газификации твердых топлив при низких давлениях после конденсации водяных паров получают сухой газ, который состоит в основном из смеси CO и H_2 и имеет теплоту сгорания $11-12 \text{ МДж/м}^3$.

Термодинамика процессов газификации твердых топлив хорошо изучена, что позволяет рассчитывать состав продуктов исходя из состава угля и условий процесса. Кинетические параметры газификации твердых топлив можно вычислить только приближенно с использованием эмпирических характеристик и коэффициентов. Такие расчеты показали, что состав получаемого газа зависит от геометрии газогенератора и режима процесса [79].

Используемые в промышленности газогенераторы различаются характером взаимодействия твердого топлива с дутьем. Интенсивность процессов в газогенераторе оценивается удельным расходом газифицируемого топлива, или его расходом на единицу площади аппарата в единицу времени [80].

При газификации углей основными процессами являются: возгонка летучих веществ, окисление углерода и восстановление CO_2 до CO . Различают газификацию твердого топлива с целью получения газов:

- заданной теплоты сгорания;
- заданного состава.

Существуют различные типы процессов газификации углей. Наиболее эффективным и отработанным в промышленном масштабе, является процесс газификации угля под давлением, позволяющий получать как средне калорийный бытовой газ, так и газ для последующего синтеза [81].

Рассмотрим для примера типы реакций, реализующихся в слоевом газификаторе (рисунок 1.8) [82].

В нижней части реактора непосредственно над колосниковой решеткой, через которую непрерывно поступает газифицирующий компонент (перегретый пар и кислород), находится зона горения (окислительная зона)

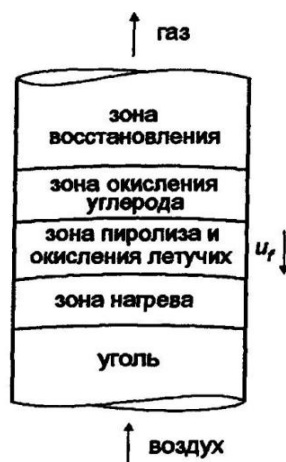
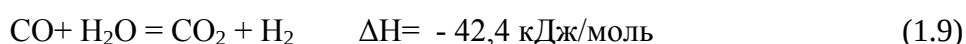
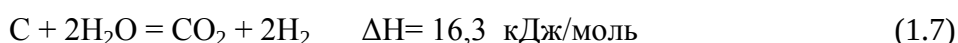
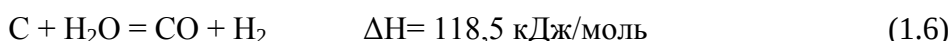
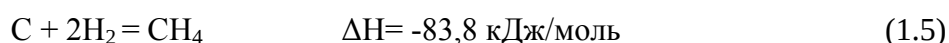
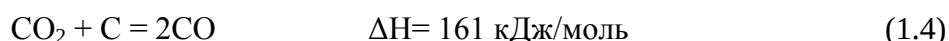
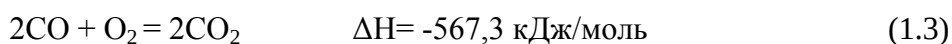
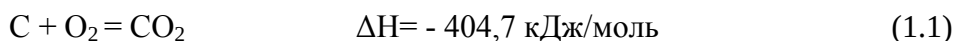


Рисунок 1.8 – Схема слоевого газификатора

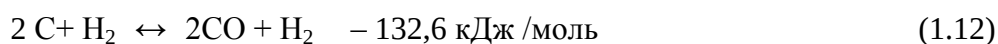
В зоне окисления протекают реакции 1.1-1.3, в зоне восстановления – реакции 1.4-1.9.

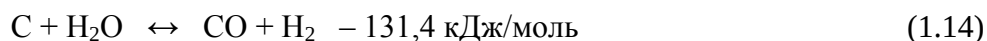
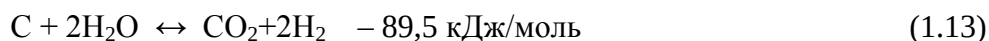


В зоне окисления реализуются следующие основные реакции образования CO и CO₂:

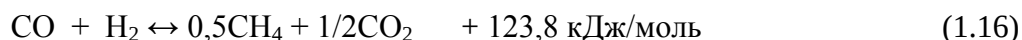


Над зоной горения расположена первичная восстановительная зона (зона теплопоглощения) с основными реакциями раскалённого углерода и водяного пара, в которой генерируется H₂:





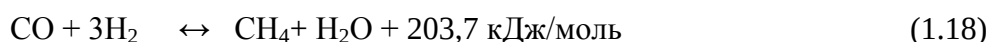
Еще выше находится вторичная восстановительная зона (зона прогрева топлива) со следующими основными реакциями:



Образовавшийся в окислительной и восстановительных зонах диоксид углерода (при недостатке кислорода) восстанавливается новыми порциями углерода в оксид углерода:



При взаимодействии CO и H₂ может образовываться метан, который в процессе подвергается термическому распаду:



В верхней части реактора имеется газовое пространство с газовыпускным отверстием. Ниже располагается зона выделения летучих или зона полукоксования. Сочетание всех этих основных реакций определяет состав образующегося газа, который изменяется по высоте газификатора [83,84].

При подаче в генератор паровоздушной смеси водяной пар, проходя вместе с воздухом через окислительную зону, перегревается и тем самым снижает температуру слоя. Далее, в восстановительной зоне перегретый пар разлагается с образованием водорода и окиси углерода. Так как реакция разложения пара протекает с поглощением тепла, температура снижается и в зоне восстановления. Таким образом, применение паро-воздушного дутья позволяет использовать избыток тепла в зоне газификации и повысить теплоту сгорания газа [85-88].

При увеличении расхода пара температура в зоне газификации снижается, из-за чего падает содержание окиси углерода в газе. Так как разложение пара происходит при более низких температурах, чем разложение двуокиси углерода, то газ может обогащаться водородом при одновременном обеднении окисью углерода. В процессе газификации, чем выше выход летучих веществ из угля, тем выше теплота сгорания смешанного генераторного газа.

Удельный выход газа на 1 кг газифицируемого угля зависит от влажности и зольности угля и выхода летучих. Выход газа падает с увеличением выхода летучих, поскольку с повышением выхода летучих увеличивается доля топлива, переходящего в смолу, и уменьшается доля топлива, превращающегося в газ.

Во избежание плавления золы и шлакования газогенератора процесс газификации при получении смешанного газа ведут на таком паровом режиме, который позволяет поддерживать температуру процесса более низкую, чем температура плавления золы угля. Однако при низкой температуре в газогенераторе резко увеличиваются потери топлива, так как значительная часть углерода не успевает прореагировать с паром. Таким образом, легкоплавкость золы угля приводит к потерям горючего со шлаком.

В газогенератор загружается холодный уголь, содержащий влагу. Тепло продуктов газификации может быть использовано для термической подготовки его перед поступлением в реакционную зону [89].

Выводы по главе 1

1. Из приведенных сведений можно сделать вывод, что добыча альтернативных углеводородов в начале 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. Этот подход сочетает в себе и преимущество использования низкосортных топлив, и возможность глубокой переработки органических пород.

2. Для конверсии органической массы твердых топлив предлагается использовать электрофизический нагрев породы непосредственно на месте залегания пласта и пиролизную деструкцию с образованием газообразных и жидких горючих продуктов. Доступ к пласту при этом должен осуществляться через скважины. Электроды, соединенные силовыми кабелями с наземным электрофизическим оборудованием, погружаются в скважины на уровень продуктивного пласта.

3. Для выделения тепловой энергии в пласте могут использоваться такие электрофизические эффекты, как диэлектрические и резистивные потери, плазма частичных разрядов в порах, электрический тринг, электрический 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.

Глава 2 Исследование теплофизических характеристик углей Казахстана

Исследование теплофизических свойств углей имеет определенный научный и практический интерес для выявления их теплотворных характеристик.

Из теплофизических характеристик особое значение имеет теплоемкость [90]. Наряду с теплопроводимостью она позволяет также определить температуропроводность. Теплота сгорания характеризует энергетическую ценность углей [91-94].

2.1 Методика проведения экспериментов и расчета теплофизических характеристик угля

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 [95]. За один опыт определяется температурная зависимость изучаемого параметра. 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 $\pm 10\%$ [96].

Измерения проводили в режиме монотонного, близкого к линейному нагревания образца со средней скоростью 0,1 К/с при перепадах температур на 3-30 К. Исследуемый образец помещали в металлическую ампулу измерительной ячейки, разогревали непрерывным тепловым потоком через тепломер. Через каждые 25 К с помощью микровольтамперметра Ф-136 и секундомера СЭЦ-100 измеряли временное запаздывание температуры ампулы по отношению к температуре основания. При каждой температуре через 25 К проводились по пять параллельных опытов, результаты которых усреднялись. Проверка работы прибора проводилась путем определения стандартной теплоемкости эталонного материала – $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и его опытное значение $C_p^0(298,15)=76,0$ Дж/(моль·К) удовлетворительно согласуется с его рекомендованной величиной 79,0 Дж/(моль·К) (справочные данные) [97]. Предварительно проводится градуировка измерителя, которая заключается в экспериментальном определении тепловой проводимости тепломера K_T . Для этого необходимо провести по пять экспериментов с

пустой ампулой и столько же с медным образцом.

Тепловая проводимость тепломера определяется по формуле 2.1:

$$K_T = \frac{C_{OBR\ M}}{\bar{\tau}_{TM} - \bar{\tau}_T} \quad (2.1)$$

где: $C_{OBR\ M}$ – полная теплоемкость медного образца, Дж/К; $\bar{\tau}_{TM}$ – среднее значение времени запаздывания на тепломере в экспериментах с медным образцом, с; $\bar{\tau}_T^0$ – среднее значение запаздывания на тепломере в эксперименте с пустой ампулой, с.

Полная теплоемкость медного образца определяется по формуле 2.2:

$$C_{обр.м.} = C_m \cdot m_{обр} \quad (2.2)$$

где: C_m – табличное значение удельной теплоемкости меди, Дж/(кг·К); $m_{обр.}$ – масса медного образца, кг.

Значение удельной теплоемкости исследуемых веществ определяли по формуле 2.3

$$C_{уд} = \frac{K_T}{m_0} (\tau_T - \tau_T^0) \quad (2.3)$$

где: K_T – тепловая проводимость тепломера; m_0 – масса исследуемого вещества, кг; τ_T – время запаздывания температуры на тепломере, с; τ_T^0 – время запаздывания температуры на тепломере в экспериментах с пустой ампулой, с. Затем из значений удельной теплоемкости вычисляются значения мольной теплоемкости по формуле 2.4:

$$C_m = C_{уд} \cdot M \quad (2.4)$$

где $C_{уд}$ – удельная теплоемкость вещества, Дж/(кг·К); M – молярная масса вещества, г/моль.

При каждой температуре проводили 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):

$$\bar{\delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}{n-1}} \quad (2.5)$$

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 (2.6):

$$\Delta_c = \frac{\bar{C} - C_0}{C_0} \cdot 100, \quad (2.6)$$

где: Δ_c – систематическая составляющая погрешности, %; C_0 – значение теплоемкости образцовой меры (по свидетельству), взятое при температуре, при которой определялась теплоемкость, Дж/(кг·К).

Предел допускаемой основной погрешности рассчитывался по формуле 2.7:

$$\Delta = \Delta_c + \overset{\circ}{\Delta}. \quad (2.7)$$

Сравнение случайной составляющей погрешности ($\overset{\circ}{\Delta}$) с систематической составляющей погрешности (Δ_c) и ошибкой в измерении температуры в расчетах оказало, что они по сравнению со случайной составляющей ($\overset{\circ}{\Delta}$) пренебрежимо малы ($\overset{\circ}{\Delta} \gg \Delta_c + \Delta$). Это позволило согласно теории ошибок точность измерений определять случайной ошибкой ($\overset{\circ}{\Delta}$) [98]. Для удобства среднееквадратичное отклонение ($\bar{\delta}$) выражено в Дж/(г·К).

О достоверности полученных значений теплоемкости исследуемых соединений может свидетельствовать тот факт, что опытное значение стандартной теплоемкости арсената натрия Na_3AsO_4 , определенное на этом же калориметре ИТ-С-400 и равное 169,1 Дж/(моль·К) [96], удовлетворительно согласуется с его рекомендованной величиной 170 Дж/(моль·К), приведенной в справочнике [97]. Работа прибора проверена также при определении теплоемкости $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Полученное значение $C_p^\circ(298,15) \text{ Al}_2\text{O}_3$ [76,0 Дж/(моль·К)] удовлетворительно согласуется со справочными данными [79,0 Дж/(моль·К)] [97].

На основании опытных данных по теплоемкостям и расчетных значений $S^\circ(298,15)$ вычисляются температурные зависимости термодинамических функций $H^\circ(T) - H^\circ(298,15)$, $S^\circ(T)$ и $\Phi^{**}(T)$ исследуемых углей по следующим формулам [99]:

$$H^\circ(T) - H^\circ(298,15) = \int_{298,15}^T \Delta C_p^\circ dT, \quad (2.8)$$

$$S^\circ(T) = S^\circ(298,15) + \int_{298,15}^T (\Delta C_p^\circ / T) \cdot dT, \quad (2.9)$$

$$\Phi^{xx}(T) = S^0(T) - \frac{H^0(T) - H^0(298,5)}{T}. \quad (2.10)$$

В вычисленных по опытным значениям теплоемкостей уравнениях зависимости $C_p^0 \sim f(T)$ для определения погрешностей коэффициентов использовали среднюю случайную составляющую погрешности для всего температурного диапазона.

2.2 Результаты экспериментальных работ и их обсуждение

Для калориметрических исследований отобраны угли месторождений Казахстана каменных марки ГЖ Сарыадыр (Надежный), марки ГЖО Сарыадыр (Пятиметровый), энергетических марки КСН Богатырь и бурого угля Майкубен марки Бз [100,101].

В таблице 2.1 приведены физико-химические свойства и петрографический состав исследуемых углей.

Таблица 2.1 – Физико-химические свойства и петрографические составы углей

Месторождение	W^{daf}	A^{daf}	V^{daf}	S^{daf}	C^{daf}	O^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	Петрографический состав				
									Vt	L	Sm	F	R ₀
Сарыадыр («Пятиметровый»)	2,56	27,5	28,03	0,50	80,70	12,29	5,52	0,99	67	4	2	18	0,41
Сарыадыр («Надежный»)	2,94	46,47	23,03	0,71	80,47	12,97	5,26	0,77	65	5	2	17	0,43
Майкубен (Шоптыколь)	9,50	23,44	49,99	0,77	73,81	19,48	4,99	1,01	79	7	1	14	0,46
Богатырь (Экибастуз)	5,4	42,10	32,64	0,55	81,50	10,59	5,32	1,62	68	4	2	4	0,45

При технологическом использовании углей одной из характеристик является ее элементный состав, т.е. содержание атомов основных элементов – С, Н, N, O и S, значения которых приведены в таблице 2.1. Анализ физико-химических свойств углей, разрабатываемых месторождений показывает, что зольность исследуемых углей колеблется в пределах от 23,44 до 46,47 при среднем содержании углерода 79,12% и водорода 5,3%. Петрографический состав в исследуемых углях основном содержит витринит от 65 до 79%, а фюзенит содержится в основном в каменных углях и доходит до 18%.

Результаты термохимических вычислений теплоемкости C_p^0 , [Дж/(г·К)] исследуемых углей в интервале температур 298,15-473 К приведены ниже в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Температурные зависимости удельных теплоемкостей углей, [Дж/(г·К)]

Т, К	$C_p \pm \delta$	
	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 [102,103]. Приведены ниже соответственно уравнения теплоемкости [Дж/(г·К)] углей месторождений Сарыадыр (Надежный), Сарыадыр (Пятиметровый), Майкубен, Богатырь

$$C_p = (1,2794 \pm 0,0855) + (3,0579 \pm 0,2044) \cdot 10^{-3} T - (1,0789 \pm 0,0721) \cdot 10^5 T^{-2} \quad (2.11)$$

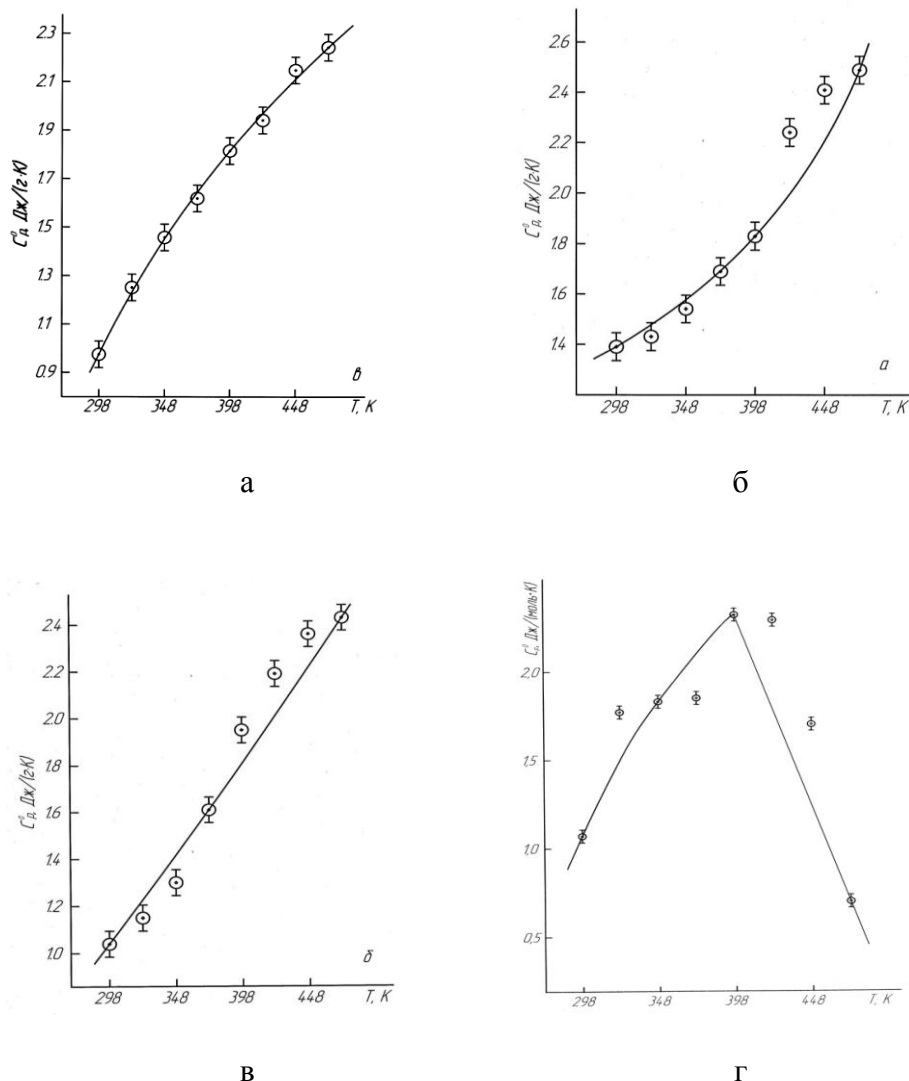
$$C_p = -(5,9350 \pm 0,3835) + (15,9373 \pm 1,0299) \cdot 10^{-3} T + (1,9905 \pm 0,1286) \cdot 10^5 T^{-2} \quad (2.12)$$

$$C_p = -(1,96 \pm 0,12) + (9,03 \pm 0,54) \cdot 10^{-3} T + (0,27 \pm 0,02) \cdot 10^5 T^{-2} \quad (2.13)$$

$$C_{p(1)} = (3,98 \pm 0,22) - (0,14 \pm 0,01) \cdot 10^{-3} T - (2,55 \pm 0,14) \cdot 10^5 T^{-2} \quad (2.14)$$

$$C_{p(2)} = (9,90 \pm 0,53) - (19,05 \pm 1,03) \cdot 10^{-3} T \quad (2.15)$$

Ниже на рисунке 2.1 представлены графические зависимости $C_p \sim f(T)$ исследуемых углей.



а) Сары-Адыр (Надежный), б) Сары-Адыр (Пятиметровый), в) Майкубен, г) Богатырь

Рисунок 2.1 – Зависимость теплоемкости углей от температуры

Для угля разреза «Богатырь» наблюдается наличие на кривой зависимости $C_p^0 \sim f(T)$ фазового перехода II-рода при 398 К. С учетом температуры фазового перехода выведены уравнения температурной зависимости теплоемкости. Это связано с маркой исследуемых Богатырь относятся к каменным, и структурой морфологического состава угля. Значения температурных зависимостей термодинамических функций углей $H^0(T) - H^0(298,15)$, $S^0(T)$ и $\Phi^{**}(T)$ рассчитаны по известным формулам. Полученные результаты приведены в таблицах 2.3,2.4.

Таблица 2.3 – Термодинамические функции для Сарыадырского месторождения (пласты «Надежный» и «Пятиметровый»)

Т, К	$S^0(T)$, Дж/(моль·К)		$H^0(T) - H^0(298,15)$, Дж/г		$\Phi^{**}(T)$, Дж/(г·К)	
	Надежный	Пятиметровый	Надежный	Пятиметровый	Надежный	Пятиметровый
323	17±1,7	23±2,3	4103±296	3726±257	14±1,4	37±3,7
348	38±3,9	38±3,8	8242±595	5141±355	15±1,5	38±3,8
373	49±5,0	49±4,8	15234±1100	12182±842	16±1,6	42±4,2
398	65±6,64	65±6,4	19541±1411	18546±1282	17±1,7	52±5,2
423	83±8,48	95±9,4	27654±1997	23765±1642	20±2,0	62±6,1
448	105±10,73	104±10,3	34819±2514	32845±2270	25±2,6	63±6,2

Таблица 2.4 – Термодинамические функции для Майкубенского, Богатырского месторождений

Т, К	$S^0(T)$, Дж/(г·К)	$H^0(T) - H^0(298,15)$, Дж/г	$\Phi^{**}(T)$, Дж/(г·К)
Майкубен			
323	0,18±0,02	26,15±1,49	0,10±0,0087
348	0,27±0,02	57,29±3,26	0,11±0,0095
373	0,38±0,03	94,18±5,36	0,12±0,0104
398	0,49±0,04	137,39±7,82	0,14±0,0122
423	0,61±0,05	187,34±10,66	0,17±0,0148
Богатырь			
323	23±1,7	4198±311	11±1,1
348	35±2,6	8456±627	12±1,2
373	48±3,6	13111±972	15±1,6
398	62±4,6	18321±1358	17±1,8
423	84±6,2	24213±1794	23±2,4
448	114±8,4	32465±2406	25±2,6

Выводы по главе 2

1. Впервые методом экспериментальной калориметрии в интервале 298,15-473 К определены температурные зависимости теплоемкости исследуемых углей месторождения Сарыадыр (пласт надежный и пятиметровый) марки ГЖ и ГЖО, Богатырь марки КСН и Майкубен марки Бз.

2. На основании экспериментальных данных были рассчитаны термодинамические показатели исследуемых углей, эмпирическим уравнением вычислены энтальпии сгорания углей. Знание условий термодинамических закономерностей протекания химических реакций позволяет управлять сложными физико-химическими процессами.

3. Полученные результаты представляют определенный практический интерес для прогнозирования теплотворной способности теплопроводности, температуропроводности углей аналогичных месторождений.

Глава 3 Исследование кинетики термического разложения углей казахстана

3.1 Методика проведения экспериментов на термогравиметрическом анализаторе

Определение показателей качества влажного угля может привести к значительным погрешностям в результатах за счет постепенной подсушки угля в ходе анализа. Для устранения этих погрешностей рекомендуется проводить анализ пробы, подсушенной (доведенной) до воздушно-сухого состояния, которое характеризуется установлением равновесия между влажностью угля и окружающей атмосферы. Воздушно-сухое состояние достигается высушиванием угля на воздухе до постоянной массы, т. е. до тех пор, пока масса пробы практически перестанет изменяться. Влажность воздушно-сухого угля при данном измельчении — величина относительно постоянная. Изменение влажности и температуры воздуха смещает установившееся равновесие, но значение содержания влаги в угле, как правило, остается в пределах погрешности определения. Пробу охлаждают на воздухе и измельчают в один прием в мельнице лабораторного типа (дробилке) до крупности – 0,2 мм. Периодически проверяют крупность аналитической пробы, проводя контрольное просеивание через стандартное сито с сеткой № 020. Таким образом, разделка лабораторной пробы до аналитической складывается из операций подсушивания, измельчения и сокращения. Основное требование к процессу измельчения: проба должна быть измельчена полностью, т.е. не допускается отбрасывание трудно измельчаемых включений, например, породы, колчедана и т.д. Это положение относится к ручному и механическому измельчению проб, а также к доизмельчению остатка, не прошедшего через сито при контрольном просеивании угля.

При измельчении воздушно-сухой лабораторной пробы до аналитического порошка условия равновесия с влажностью окружающей атмосферы будут нарушены, и для доведения аналитической пробы до воздушно-сухого состояния необходимо дополнительное подсушивание на воздухе. При этом, влага, потерянная в результате подсушивания, называется внешней влагой.

Определение влажности угля

Если в результате подготовки пробы угля теряется *внешняя* влага, то термогравиметрический анализ позволяет определить *внутреннюю* влагу.

Влажность определяется путем измерения потерь в массе анализируемого образца угля при нагреве в определенных условиях: температуре, времени, атмосфере, массы образца, характеристик оборудования.

Для определения влажности тестовый образец в тиглях без крышек нагревали на приборе ТГА при температуре 107 ± 3 °С. Используют показатели потока сушильного газа в количестве

от 0,4 до 1,4 от изменений объема печи за минуту. Программируют прибор на завершение теста, когда тестовые образцы и тигли достигнут постоянной массы. В качестве альтернативы программируют прибор для определения влажности путем нагрева тестового образца на 1 час.

В общем случае влажность в анализируемом образце (в процентах) рассчитывается следующим образом:

$$M = [(W-B) / W] \times 100 \quad (3.1)$$

где W – масса образца до нагрева, (в граммах); B – масса образца после нагрева (в граммах).

Основные параметры для определения влажности:

- температура – 107 °C;
- скорость нагрева – 6 °C/мин;
- тип – остановка по массе;
- отклонение -0,001;
- газ – азот;
- без крышки;
- взвешивание при нагреве.

В специальной программе (на компьютере), которая управляет прибором ТГА, содержание влаги определяется по формуле:

$$(X[0] - (X[1] - Y[1])) / X[0] \times 100 \quad (3.2)$$

где X[0] – вес пробы в начале анализа; X[1] – вес пробы в конце этапа 1; Y[1] – вес контрольного тигля в конце этапа 1.

Определение летучих веществ угля

Для обеспечения нейтральной атмосферы используют азот (или аргон) показателями потока от 0,7 до 1,4 от изменений объема печи за минуту для выметания летучих веществ. Поднимают температуру печи таким образом, чтобы температура выросла с 107 °C до 950 ± 20 °C за период времени, равному 26-30. Программируют прибор на удержание этой температуры на 7 минут. ТГА взвешивает закрытые тигли через определенные промежутки времени в течение роста температуры печи. Масса тиглей с крышками в конце выдержки 7-минутного периода времени используется для подсчета летучих веществ.

Если определение летучих веществ в анализируемом образце проводится непосредственно после определения влажности (в две стадии последовательного определения влажности, затем – летучести), то летучесть (в процентах), V, определяется следующим образом:

$$V = [(B-C) / W] \times 100 \quad (3.3)$$

где С – масса тестируемого образца после нагрева (в граммах).

Если определение летучих веществ проводится отдельно, то летучесть определяется следующим образом:

$$D = (W-C) / W \times 100 \quad (3.4)$$

где D – потеря массы, %; $V = D - M$

Основные параметры для определения летучести:

Температура – 915 °С.

Скорость нагрева – 30° С/мин.

Тип – остановка по времени.

Выдержка – 7:00.

Газ – азот.

С крышкой.

Взвешивание при нагреве.

В специальной программе (на компьютере), которая управляет прибором ТГА, содержание летучих веществ определяется по формуле:

$$(X[0]-X[1]-B)/X[0]*100 \quad (3.5)$$

где X[0] - вес пробы в начале анализа; X[1] – вес пробы в конце этапа 1; В – вес крышечки тигля в начале анализа

Определение зольности угля

Зольность определяется путем измерения массы остатков, оставшихся после сжигания образца угля или кокса в определенных условиях: температуре, времени, атмосфере, массы образца, характеристик оборудования.

Определение зольности по остаткам (высушенные тестовые образцы) от определения влажности проводится путем изменения атмосферы печи на кислород или воздух и повышением температуры печи до таких показателей, чтобы конечная температура в 500 ± 10 °С была достигнута к концу 1 часа. Для углей продолжают нагревать образцы до того, как температура поднимется с 500 °С до 750 ± 15 °С к концу 1 часа. Если в качестве окислительного газа выступает воздух, показатель потока устанавливается от 0,4 до 0,5 изменений объема печи за минуту. Если в качестве окислительного газа выступает кислород, показатель потока устанавливается от 1,3 до 1,4 изменений объема печи за минуту. Продолжают нагревать и взвешивать тестовые образцы при высокой температуре, пока они не достигнут постоянной

массы. В качестве альтернативы программируют прибор для определения зольности путем нагрева тестовых образцов не менее чем 2 часа для угля после достижения конечной высокой температуры (750 °С или 950 °С).

Зольность в анализируемом образце, А (в %), определяется следующим образом:

$$A = [(F - G) / W] \times 100 \quad (3.6)$$

где, F – масса тигля и остатков золы, в граммах; G – масса пустого тигля, в граммах.

Основные параметры для определения зольности отдельно:

Температура – 750 °С.

Скорость нагрева – 12 °С/мин.

Тип – остановка по отклонению массы.

Отклонение – 0,001.

Газ – кислород.

Без крышки.

Взвешивание при нагреве.

В специальной программе (на компьютере), которая управляет прибором ТГА содержание золы определяется по формуле:

$$(X [1] - Y[1]) / X[0] * 100 \quad (3.7)$$

где X[1] – вес пробы в конце этапа 1; Y[1] – вес контрольного тигля в конце этапа 1; X[0] – вес пробы в начале анализа.

3.2 Методика проведения термогравиметрического анализа для определения кинетических параметров термического разложения угля

Эксперименты проводили на дериватографическом анализаторе при разных скоростях нагрева в пределах 3-15 град/мин и фракцией образцов угля с размерами гранул $d \approx 0,2$ мм. Нагрев образцов проводился в керамических тиглях в интервале температур 25-900 °С в инертной среде азота. Навеска образцов составляла 1 грамм.

Эксперименты на приборе ТГА проводили при двух атмосферах печи: азот и кислород. 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 ($^{\circ}\text{C}/\text{мин}$), времени (сек), температур ($^{\circ}\text{C}$). Данные параметры фиксируются через определенные промежутки времени в течение всего периода запрограммируемого нагрева.

3.3 Метод расчета кинетических параметров термического разложения угля

В зависимости от температурных условий ведения процесса различают две схемы исследования: 1) изотермическая схема, когда образец помещается в стационарное температурное поле; 2) неизотермическая схема, когда нагрев образца производится с постоянной скоростью. Одним из главных преимуществ изотермического метода является то, что экспериментальные данные очень легко поддаются строгой математической обработке. Но имеются и недостатки, которые выражаются в большой продолжительности опыта, трудоемкости соблюдения условий изотермичности, невозможности определения энергии активации по результатам одного опыта. Неизотермический метод лишен всех недостатков изотермического метода, поэтому данный метод получил широкое распространение, позволяющий за относительно короткое время получить большую информацию о характере процесса разложения с регистрацией всех стадий превращения в широком температурном диапазоне. Наиболее распространены дифференциально-термический и термогравиметрический методы анализа. Применение этих методов позволяет рассчитать кинетические параметры соответствующих процессов, тепловые эффекты реакции, температуру начала разложения и другие важные характеристики.

Целью данной работы является определение кинетических параметров процесса термического разложения углей месторождений Сарыадыр (Пятиметровый и Надежный) и Майкубе и разреза Богатырь.

Для характеристики исследуемого процесса выбраны следующие показатели: потери масс образцов в различных температурных интервалах; температуры T_{max} , скорости v_{max} , константы скорости k_{max} , соответствующие наибольшей скорости потери массы (т.е. максимумам основного разложения на кривых DTG в точках перегиба); предэкспоненциальный

множитель k_0 и энергия активации $E_{\text{акт}}$, относящиеся к стадиям основного термического разложения угля.

Наличие различных конкурирующих последовательно-параллельных процессов при термохимических превращениях углей (по молекулярному и радикально-цепному механизму) часто приводит к колебаниям суммарного порядка реакции в пределах 0,5-1,5. Описать весь процесс разложения угля одним уравнением 1-го порядка (мономолекулярного превращения) нельзя, поскольку в реальных условиях распад органической массы угля (ОМУ) происходит при взаимном влиянии веществ различной природы составляющих ОМУ [104,105]. Но процесс основного термического разложения можно описать уравнением формальной кинетики 1-го порядка и рассчитать $E_{\text{акт}}$. Поэтому в силу многообразия и сложности физико-химических превращений данные кинетические параметры описывают не определенные реакции, а суммарные процессы термического разложения ОМУ, поэтому они рассматриваются как «эффективные параметры» формальной кинетики [106].

Общий вид кривых DTG и TG представлен на рисунке 3.1.

Математическую обработку кривых проводили по следующему алгоритму. Кинетические параметры основного термического разложения ОМУ определяли на основе уравнений неизотермической формальной кинетики [107].

В качестве исходного уравнения выбрано уравнение:

$$v = d\alpha/dt = f(\alpha) \cdot k \quad (3.8)$$

где v – скорость процесса, α – степень превращения ОМУ, $f(\alpha)$ – функция степени превращения.

Степень превращения α находим как (рисунок 3.1):

$$\alpha = \frac{\Delta m_i}{\Delta m} \quad (3.9)$$

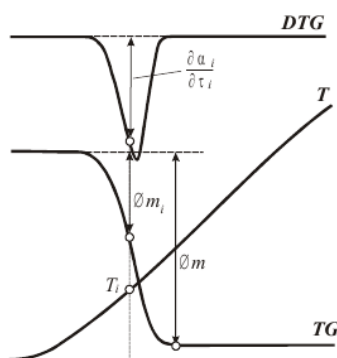


Рисунок 3.1 – Общий вид кривых DTG и TG

Согласно уравнению Аррениуса:

$$k = k_0 e^{-E/RT} \quad (3.10)$$

где k – константы скорости; k_0 – предэкспоненциальный множитель; E – энергия активации; T – абсолютная температура.

Подставляя уравнение (3.11) в (3.12) получим:

$$v = d\alpha/dt = f(\alpha) \cdot k_0 e^{-E/RT} \quad (3.11)$$

Согласно экспериментальным данным [105], процессы основного термического разложения угля протекают по 1-му порядку, поэтому функция $f(\alpha) = 1 - \alpha$. Тогда при помощи логарифмирования уравнение (3.12) преобразуется к виду:

$$\ln \left[\frac{1}{1-\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{d\tau} \right] = \ln k_0 - \frac{E}{RT} \quad (3.12)$$

Уравнение (3.13) представляет собой линейное уравнение $y = b + a \cdot x$, в котором:

$$y = \ln \left[\frac{1}{1-\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{d\tau} \right], \quad b = \ln k_0, \quad a = -E, \quad x = 1/RT \quad (3.13)$$

Это позволяет уложить экспериментальные точки на прямую, по тангенсу угла наклона которой к оси абсцисс можно вычислить энергию активации процесса, а по отрезку, отсекаемому по оси ординат, – предэкспоненту, как показано на рисунке 3.2.

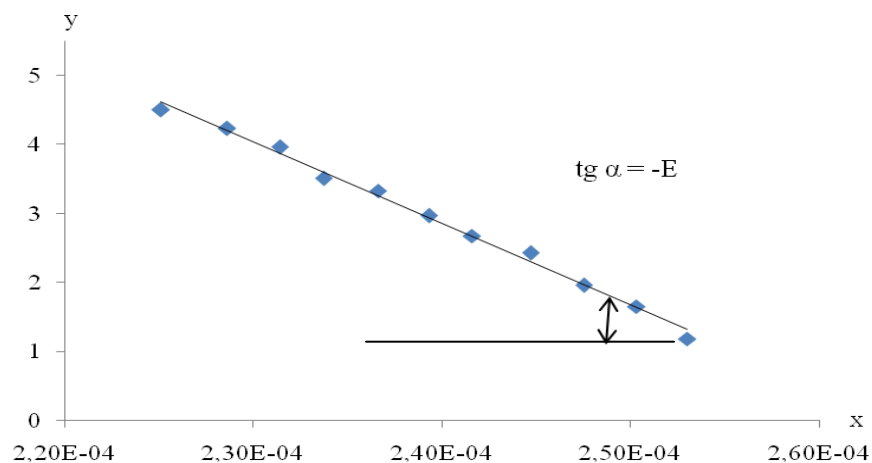


Рисунок 3.2 – Аррениусовская зависимость кинетических параметров

Для получения надежных результатов экспериментальные данные рассчитывают по методу наименьших квадратов, согласно которому коэффициенты а и b равны:

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}, \quad b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.14)$$

Среднеквадратичные ошибки определения а и b (а значит и энергия активации и предэкспонента) рассчитывают как:

$$S_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2}{(n-2) \sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2}}, \quad S_b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2 - x_i}{(n-2)}} \left(\frac{1}{n} + \frac{x_{cp}^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2} \right) \quad (3.15)$$

Исходя из (9) определяют энергию активации и предэкспоненту:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n \ln \left(\frac{1}{1-\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{d\tau} \right) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{RT} - n \sum_{i=1}^n \ln \left(\frac{1}{1-\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{d\tau} \right) \cdot \frac{1}{RT}}{n \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{RT} \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{RT} \right)^2} \quad (3.16)$$

$$k_0 = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n \ln \left(\frac{1}{1-\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{d\tau} \right) - a \sum_{i=1}^n \ln \frac{1}{RT}}{n} \right] \quad (3.17)$$

Для расчета кинетических параметров термической деструкции ОМУ с использованием вышеприведенных уравнений (3.8-3.17) исходными данными являются: массивы значений массы (навесок неразложившегося угля), времени, температуры, а также значения порядковых номеров точек начала и конца стадий разложения на кинетических кривых DTG и количество этих точек.

Увеличение размера угольных частиц d=0,2-5 мм приводит к небольшому повышению степени разложения ОМУ (7-8 %) и не оказывает существенного влияния на кинетику исследуемого процесса.

Таблица 3.1 – Кинетические параметры термической деструкции ОМУ углей

Скорость нагрева, °С /мин	Стадии основного разложения					
	1 стадия			2 стадия		
	$k_{\max}, 10^{-3} \text{ c}^{-1}$	$k_0, 10^2 \text{ c}^{-1}$	$E_{\text{акт}}, \text{ кДж/моль}$	$k_{\max}, 10^{-3} \text{ c}^{-1}$	$k_0, 10^4 \text{ c}^{-1}$	$E_{\text{акт}}, \text{ кДж/моль}$
3	1,35	2,72±0,13	43,7±0,92	1,23	1,45±0,03	98,2±3,7
6	1,65	7,42±0,64	46,3±2,76	1,19	1,94±0,12	93,3±2,9
9	1,47	1,89±0,11	40,3±2,61	1,34	0,71±0,03	86,8±3,6
12	1,69	2,78±0,18	44,8±2,23	1,52	0,54±0,06	82,6±3,4
15	1,39	1,65±0,06	38,3±1,75	1,32	0,47±0,02	80,1±4,8

Кинетические параметры термической деструкции ОМУ углей показаны в таблице 3.1. Как показало исследование, при переходе от одной стадии основного разложения к другой для исследуемых углей и при повышении температуры при различных скоростях в диапазоне от 3 до 15 град/мин, при повышении скорости нагрева отмечается значительное увеличение $E_{\text{акт}}$ (примерно вдвое). Разница между активационными барьерами 1-й и 2-й стадий в пределах одинаковых скоростей нагрева составляет 38-54 кДж/моль. При этом, вероятность разрыва определенных типов связей в процессе деструкции заметно возрастает, о чем свидетельствуют различия между значениями k_0 на 1-й и 2-й стадиях (на 1-2 порядка, т.е. $k_{01} \sim 10^2 \text{ c}^{-1}$, $k_{02} \sim 10^3\text{-}10^4 \text{ c}^{-1}$).

В целом можно отметить, что рассчитанные значения энергии активации соизмеримы с энергиями химических связей.

Повышение скорости нагрева β от 3 до 15 град/мин на всех стадиях разложения для исследуемых углей ОМУ приводит к сдвигу значений температур $T_{\max}$ (соответствующих максимальному разложению) в сторону больших величин ($\Delta T_{\max} \approx 100^\circ \text{ C}$) и увеличению скорости $v_{\max}$ процесса деструкции ОМУ. Величина скорости $v_{\max}$ на 2-й стадии выше, чем на 1-й. При этом, аппроксимация точек прямой линией позволяет получить приблизительные зависимости между $v_{\max}$ и β , показанные на рисунке 3.3 (R^2 – достоверность аппроксимации). Вместе с тем, разница между величинами скоростей в точках перегиба $\Delta v_{\max}$ на 1-й и 2-й стадиях также растет с повышением скорости нагрева β и взаимосвязь между $\Delta v_{\max}$ и β описывается аналогичной функцией, близкой к линейной ($y = 0,011 \cdot x - 0,026$, $R^2 = 0,967$).

Таким образом, повышение скорости нагрева оказывает на скорость реализации процесса с более высоким активационным барьером более существенное влияние, а также способствует незначительному снижению величин $E_{\text{акт}}$ на 2-й стадии разложения (98,2-80,1 кДж/моль). Однако это не оказывает столь существенного влияния на общую степень

разложения угля, что по всей видимости, связано с компенсацией более высокой скорости нагрева меньшей длительностью процесса термолиза (и наоборот).

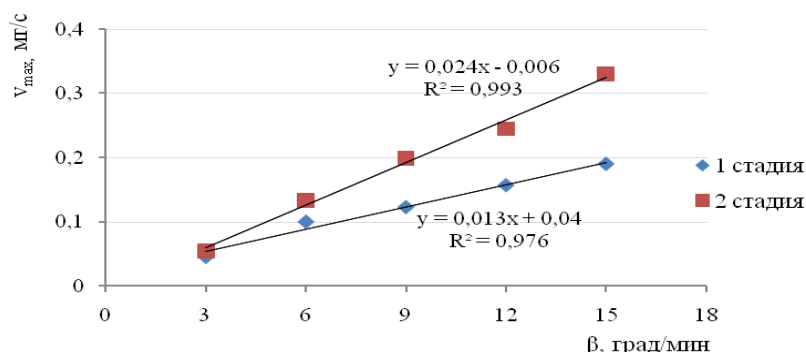


Рисунок 3.3 – Зависимость скорости деструкции в точках перегиба от скорости нагрева угля на различных стадиях разложения

3.4 Влияние скорости нагрева на степень термического разложения углей

Термогравиметрический анализ для изучения кинетики термической деструкции угля проводился в инертной среде азота при разных скоростях нагрева в пределах 3-15 град/мин и фракциях углей с размерами гранул $d=0,2-5$ мм. В приложении А представлены кривые DTG углей Сарыадыр (Пятиметровый и Надежный), Майкубен и Богатырь в среде азота.

Выявлено, что изменение массы угля Приложение А (Рисунок А.1-А.5) происходит в пять стадий. Температурному интервалу $25^{\circ}\text{C} - 110^{\circ}\text{C}$ соответствует стадия I, что соответствует выделению пирогенной воды. II стадия соответствует к интервалу $110-450^{\circ}\text{C}$, 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 $450-560^{\circ}\text{C}$ объясняется тем, что в данном интервале температур начинает выделяться смола, эту стадию обычно связывает с процессом битуминизации, когда начинает образовываться основная масса угольной смолы, но при этом недостаточно тепла для ее испарения. При дальнейшем нагревании (выше 560°C) выделяется небольшое количество газа, смола почти не выделяется, поэтому на стадии IV выход летучих компонентов не значительный. Далее на стадии V в температурном интервале $860-900^{\circ}\text{C}$ 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 (см. Приложение Б рисунки Б.1-Б.20), данные представлены в таблицах 3.2-3.5.

Степень конверсии угля месторождения Сарыадыр (Пятиметровый) при термолизе 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 3.2).

Таблица 3.2 – Потери масс образцов пробы угля марка ГЖО Сарыадыр (Пятиметровый) в различных температурных интервалах и значения $T_{\max}$ на стадиях разложения

Скорость нагрева, °С /мин	Потеря массы от навески, %			Tmax, 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 каменного угля месторождения Сарыадыр (Надежный) марки ГЖО показано некоторое снижение потери массы угля снижение потери массы угля с 28,3 до 22,1 %, при повышении скорости нагрева в диапазоне 3-15 град/мин (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Потери масс образцов пробы угля марка ГЖ Сарыадыр (Надежный) в различных температурных интервалах и значения $T_{\max}$ на стадиях разложения

Скорость нагрева, °С /мин	Потеря массы от навески, %			Tmax, 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 бурого угля месторождения Майкубен марки Бз (Шоптыколь) в диапазоне 3-15 град/мин, наблюдается повышение потери массы навески с 19,3 до 38,3%, для проб угля месторождения Богатырь (Экибастуз) наоборот снижение потери массы с 21,3 до 19,4% (таблица 3.4,3.5).

Это связано с маркой исследуемых образцов углей месторождения Сарыадыр (Пятиметровый и Надежный) марки ГЖ и ГЖО, Богатырь марки КСН относятся к каменным, а Майкубе бурым марки Бз, соответственно из-за разной структуры морфологического состава исследуемых углей, тенденции потери органической массы разные.

Таблица 3.4 – Потери масс образцов пробы угля марка Б₃ Майкубе (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 3.5 – Потери масс образцов пробы угля марка КСН Богатырь (Экибастуз) 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	2.009	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 3.4-3.5). 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 – низкие, вследствие большого содержания зольности и небольшого количества летучести .

Как видно из данных таблиц (3.2-3.5), максимальному разложению подвергаются угли месторождений Майкубе (более 40% от массы). Это указывает на их меньшую термическую устойчивость, а значит и более низкую стадию метаморфизма относительно других исследованных углей, из-за содержания в них большого количества кислорода в виде функциональных, эфирных групп и других формах. При этом процесс термического разложения наступает при более низких температурах, во время которого образуется большое количество низкомолекулярных летучих веществ в виде паров смол и газов, а нелетучих жидкофазных продуктов образуется очень мало, т. Е. стадия перехода в пластическое

состояние отсутствует. Указанные факторы находятся в согласии с тем, что данные угли содержат большое количество летучих (51-57 %).

Угли месторождения Богатырь, Сарыадыр высокочольные 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 по главе 3

1. 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 ОМУ.

2. 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.

3. Установлено, что скорость нагрева β образцов угля заметно повышает значения температуры $T_{\max}$ и скорости $v_{\max}$ деструкции, а также снижает активационные барьеры процесса. Также проведено исследование влияния нагрева в температурном интервале 30-900°C на степень термохимической деструкции образцов углей каменных Сарыадыр (Надежный) марки ГЖ, Сарыадыр (Пятиметровый) марки ГЖО, Богатырь марки КСН и бурых Майкубен марки Бз.

Глава 4 Исследование электрофизических свойств и характеристик электроразрядных явлений в углях

4.1 Исследование электрофизических свойств углей

Ископаемые угли с точки зрения электрофизических характеристик относятся к слабопроводящим материалам гетерофазного строения. Протекание электроразрядных 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.

Подготовка образцов для измерений

Для измерения диэлектрических свойств требуются образцы в форме пластинок толщиной не более 5 мм [109,110]. Образцы вырезались из цельных фрагментов угля на камнерезном станке абразивно-отрезным диском с алмазным покрытием.

Из-за наличия трещин и малой механической прочности невозможно вырезать пластинки непосредственно из угольного фрагмента. Образцы готовились следующим образом. Из исходного фрагмента углей вырезался брусок размером 55×55×100 мм (рисунок 4.1). Далее брусок оборачивался в слой полиэтиленовой пленки и заливался в отверждаемую полиэфирную смолу (рисунок 4.2).



Рисунок 4.1 – Изготовленный образец для измерения диэлектрических свойств брусок из угля



Рисунок 4.2 – Изготовленный образец для измерения диэлектрических свойств брусок, залитый в полиэфирную смолу

Полиэфирная смола придает заготовке механическую прочность и удерживает уголь при резке. При этом слой полиэтиленовой пленки не позволяет смоле проникать внутрь образца и влиять в дальнейшем на результаты измерения.

Далее полученная заготовка нарезалась на пластины с помощью абразивно-отрезного диска с алмазным покрытием (рисунок 4.3,4.4).



Рисунок 4.3 – Образец в виде пластины для измерения диэлектрических свойств



Рисунок 4.4 – Различные образцы в виде пластины для измерения диэлектрических свойств

В общей сложности получено более 100 пластин. Указанным способом из одного угольного бруска удастся получить 2-3 пластины без дефектов, которые пригодны для проведения измерений.

Поскольку осадочные горные породы, включая уголь, имеют слоистое строение, возможно возникновение анизотропии диэлектрических свойств. Если прикладываемое электрическое поле ориентировано в том же направлении, что и слои в угле, значение измеряемой величины может отличаться от измерения, в котором приложенное поле ориентировано перпендикулярно слоям. Поскольку в разрабатываемой технологии внутрислоевой газификации прикладываемое к электродам напряжение будет ориентировано преимущественно вдоль слоев углей, образцы для измерения изготавливались таким образом, чтобы поле измерительного прибора ориентировалось вдоль слоев образца.

Аппаратура и методика измерений

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. Основные характеристики измерителя Е7-20 приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Метрологические характеристики измерителя иммитанса Е7-20

Измеряемые величины	Емкость, индуктивность, активное сопротивление, реактивное сопротивление, проводимость, тангенс угла потерь, добротность, модуль комплексного сопротивления, угол фазового сдвига комплексного сопротивления, ток утечки
Диапазон измерений: сопротивление индуктивность емкость проводимость добротность, тангенс угла потерь угол фазового сдвига ток утечки	от 0,01 мОм до 1 ГОм от 0,01 нГн до 10 кГн от 0,001 пФ до 1 Ф от 0,01 нСм до 10 См от 10^{-4} до 10^4 от -90 до + 90 от 0,01 мкА до 10 мА
Диапазон частот	25 Гц..1 МГц
Точность установки частот	$\pm 0,1\%$
Уровень измерительного сигнала	0,04..1 В
Базовая погрешность	$\pm 0,1 \%$
Классы точности	С и М по ГОСТ 25242-93

Измеритель имеет ПК-совместимый интерфейс RS-232C и может работать под управлением компьютера. Поскольку для измерений во всем частотном диапазоне требовалось провести регистрацию большого количества измеряемых значений, для упрощения процедуры было разработано программное обеспечение для управления прибором (рисунок 4.5).

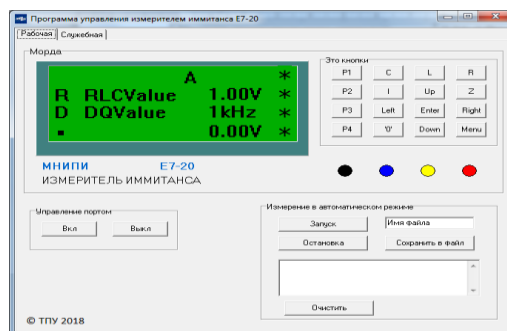


Рисунок 4.5 – Интерфейс программы управления измерителем E7-20

Программа разработана в среде Borland Delphi.

Программа позволяет произвести измерение заданной величины во всем частотном диапазоне, который обеспечивает прибор. Результаты измерения записываются в текстовый файл, который далее может быть преобразован в табличную форму.

В соответствии с ГОСТ 25495-82, измерения проводились с помощью дисковых электродов. Внешний вид измерительной оснастки приведен на рисунке 4.6,4.7.

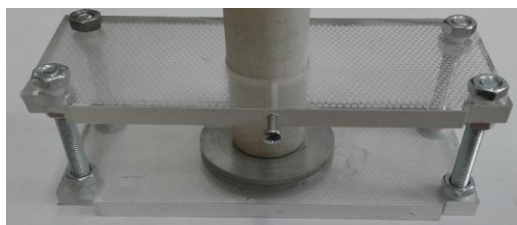


Рисунок 4.6 – Измерительная оснастка для регистрации диэлектрических свойств горных пород без образца

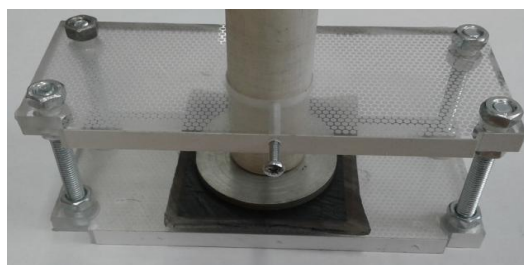


Рисунок 4.7 – Измерительная оснастка для регистрации диэлектрических свойств горных пород с установленным образцом

Образец в струбине зажимается между двумя дисковыми электродами из алюминия диаметром 50 мм и толщиной 3 мм. Толщина образца для обеспечения необходимой точности измерения не должна превышать 5 мм.

Электроды подключаются к измерителю иммитанса, и производится регистрация измеренных значений. Непосредственно измеряемыми величинами являются тангенс угла диэлектрических потерь, емкость образца и сопротивление образца. Удельная диэлектрическая проницаемость вычисляется далее как отношение измеренной емкости с образцом C и емкости аналогичного воздушного конденсатора C_0 :

$$\epsilon = C / C_0 \quad (4.1)$$

Емкость C_0 измерялась при отсутствии образца и установленном межэлектродном расстоянии, равном толщине образца. Удельная электропроводность образца определяется как отношение толщины образца h к площади электродов S и измеренному сопротивлению образца R :

$$\sigma = \frac{h}{S \cdot R} \quad (4.2)$$

Электропроводность

Электропроводность σ характеризует способность материала проводить электрический ток. С точки зрения технологий пиролизической конверсии материала электропроводность наряду с напряженностью поля E определяет мощность тепловой энергии P , которая будет выделяться в материале от протекающего тока:

$$P = \sigma \cdot E^2 \quad (4.3)$$

Для нагрева материалов, имеющих низкую величину электропроводности, требуется настолько высокая величина напряженности прикладываемого поля, что промышленное оборудование для такого нагрева технически нереализуемо.

Измерения частотной зависимости электропроводности проведены для 6 образцов углей каждого из рассматриваемых месторождений. Таблицы с результатами измерений приведены в приложении В, таблица В.1, В.2. Усредненный результат показан на рисунке 4.8.

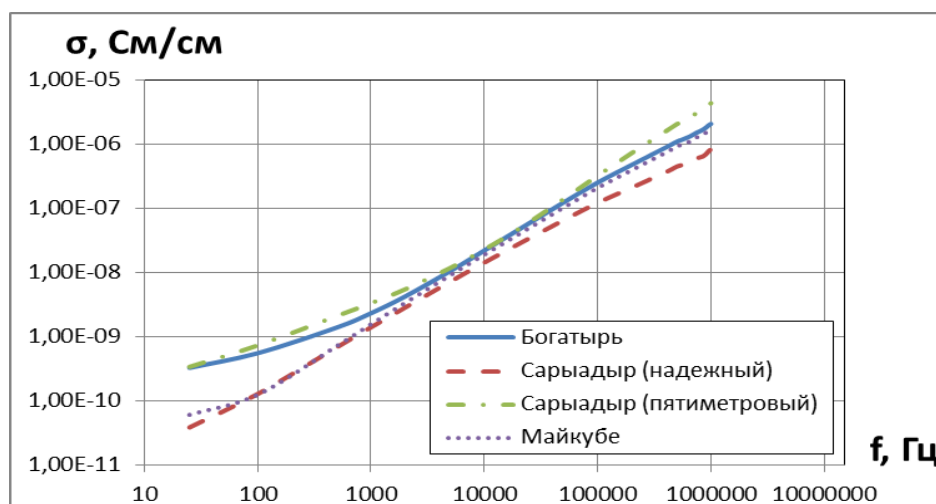


Рисунок 4.8 – Электропроводность

По величине электропроводности угли располагаются на границе между полупроводниками и диэлектриками и относятся к слабопроводящим материалам. В отличие от материалов гомогенного состава, у углей имеется тенденция к значительному увеличению электропроводности (на 3-4 порядка) с повышением частоты от 25 Гц до 1 МГц. Предположительно, это связано с их смесевым строением и включением большого числа кристаллитов и молекулярных кластеров. На границах раздела этих макроскопических элементов происходит искажение энергетической структуры электронных оболочек атомов и молекул, из-за чего в этих местах могут возникать свободные носители заряда с ограниченной подвижностью и временем жизни. Чем выше частота, тем больше таких носителей заряда может участвовать в проведении электрического тока.

Поскольку на низкой частоте электропроводность весьма низкая, непосредственный резистивный нагрев рассматриваемых углей возможен только на высоких напряженностях поля. Так, при электропроводности 10^{-9} См/см для выделения мощности тепловой энергии в 1 кВт нужно создать напряженность поля 10^6 В/см.

Диэлектрическая проницаемость

Диэлектрическая проницаемость ε является показателем поляризационной способности материала. Чем выше ее величина, тем больший емкостный ток может циркулировать через материал при воздействии переменного напряжения. Измерения частотной зависимости диэлектрической проницаемости проведены для 6 образцов углей каждого из рассматриваемых месторождений. Таблицы с результатами измерений приведены в приложении Г таблица Г.1, Г.2. Усредненный результат показан на рисунке 4.9.

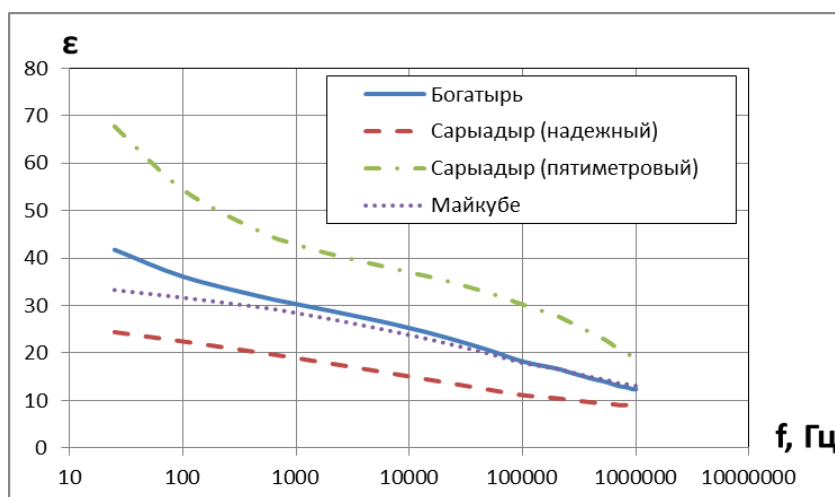


Рисунок 4.9 – Относительная диэлектрическая проницаемость

Как и для большинства гетерогенных материалов, диэлектрическая проницаемость углей снижается с увеличением частоты от 25 Гц до 1 МГц в 3-5 раз. Для большинства минеральных пород в этом частотном диапазоне ϵ составляет 3-10. У рассматриваемых углей ϵ составляет несколько десятков, что говорит о весьма высокой поляризационной способности входящих в их состав компонентов. Такими компонентами с высокой поляризуемостью являются вода (сорбированная, ионно-связанная), ОН-группы, карбоксильные группы, пирит и другие соединения серы.

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

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 [111]. На этой частоте происходит совпадение скорости изменения внешнего поля и скорости

свободной подвижности диполей вещества. Для материалов смесового строения частотная зависимость тангенса угла потерь будет представлять собой огибающую резонансных пиков различных компонентов (рисунок 4.10).

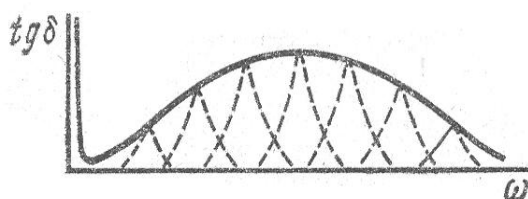


Рисунок 4.10 –Типичный вид кривой $\text{tg } \delta = f(\omega)$ для диэлектрических материалов смесового строения

Это свойство используется в методах высокочастотного нагрева материалов, как, например, при нагреве подземного нефтеносного пласта, описанном в [112]. Измерения частотной зависимости тангенса угла потерь проведены для 6 образцов углей каждого из рассматриваемых месторождений. Таблицы с результатами измерений приведены в приложении Д, таблица Д.1,Д.2. Усредненный результат показан на рисунке 4.11.

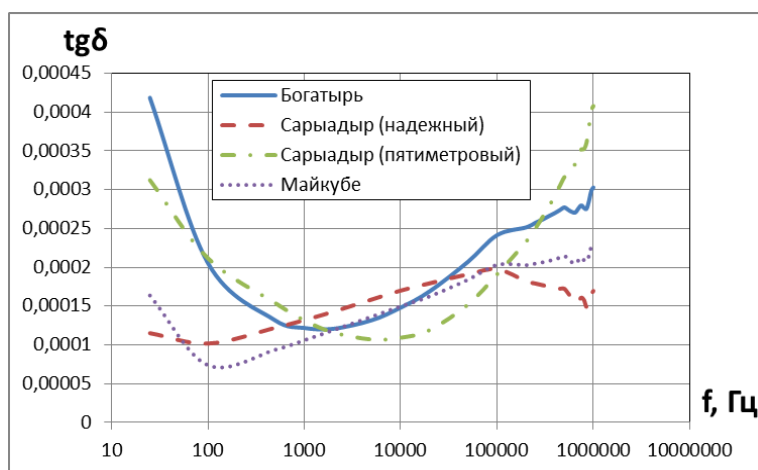


Рисунок 4.11 – Тангенс угла диэлектрических потерь

Из полученных характеристик видно, что пиковые значения $\text{tg } \delta$ для рассматриваемых углей находятся за рамками рассматриваемых частот. Таким образом, для нагрева материала только за счет диэлектрических потерь, необходимо использовать электромагнитное воздействие частотного диапазона > 1 МГц. Стоимость мощного оборудования, работающего на таких частотах, достаточно высока. Таким образом, можно предположить, что нагрев рассматриваемых углей за счет диэлектрических потерь высокочастотного электромагнитного поля вряд ли будет целесообразен. Если же пытаться производить диэлектрический нагрев в частотном диапазоне < 1 МГц, потребуется большая площадь электродов, чтобы обеспечить тепловыделение, достаточное для нагрева.

4.2 Исследование характеристик частичных разрядов и триннга

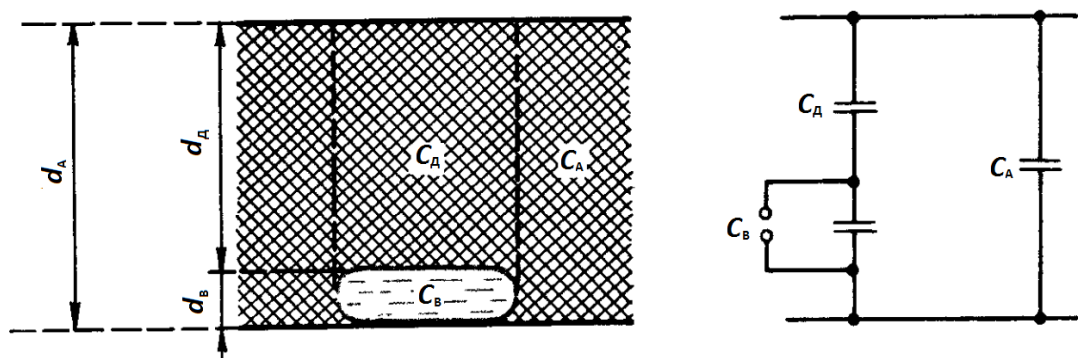
Частичные разряды

Частичные разряды (ЧР) возникают в диэлектриках под действием приложенного внешнего высокого напряжения. ЧР представляет собой неполный пробой диэлектрика, приводящий к замыканию разрядным каналом части межэлектродного расстояния. Причиной возникновения частичных разрядов является неравномерное распределение электрического поля между электродами. Для неоднородного вещества, имеющего включения из разных материалов, напряженность в межэлектродном пространстве будет распределяться обратно пропорционально диэлектрической проницаемости материалов [113]:

$$\frac{E_D}{E_B} = \frac{\varepsilon_B}{\varepsilon_D} \quad (4.4)$$

где E_D , E_B – напряженность в основной части диэлектрика и включении соответственно, ε_D , ε_B – диэлектрическая проницаемость основной части диэлектрика и включения соответственно. Таким образом, наибольшая напряженность поля будет на элементах, имеющих наименьшую диэлектрическую проницаемость. Как правило, таковыми являются газовые включения и поры. Причем, напряженность на них будет тем больше, чем выше диэлектрическая проницаемость остальной части диэлектрика.

Когда напряжение электрического поля на включении начинает превышать его электрическую прочность, происходит пробой включения [113]. Этот процесс и является частичным разрядом. Упрощенная схема ЧР показана на рисунке 4.12



d_A , d_B , d_D – толщины диэлектрика, включения и диэлектрика без включения соответственно, C_A , C_B , C_D – емкости всего диэлектрика, включения и остальной части диэлектрика соответственно

Рисунок 4.12 – Эквивалентная схема при рассмотрении ЧР в диэлектрике

Когда напряжение на разрядном промежутке C_B превышает напряжение его пробоя, емкость включения разряжается. После завершения разряда и восстановления электрической прочности разрядного промежутка происходит перераспределение зарядов между всеми тремя емкостями до установления равновесия либо до следующего частичного разряда. Из внешней цепи при этом происходит приток тока для компенсации нейтрализовавшегося заряда и повышения напряжения до исходного.

ЧР характеризуются рядом показателей, основными из которых являются напряжение и напряженность возникновения, интенсивность, кажущийся заряд. Напряжение и напряженность возникновения отражают пороговую величину приложенного поля, при котором появляются регистрируемые частичные разряды. Эта величина характеризует неоднородность исследуемого материала. Интенсивность частичных разрядов – это количество частичных разрядов, происходящих в диэлектрике в единицу времени. В случае с углями напряжение возникновения и зависимость интенсивности от напряжения отражают динамику электротепловых процессов в углях и могут служить индикаторами начала триинга и триингового пробоя. Кажущийся заряд представляет собой величину заряда, прошедшего через внешнюю электрическую цепь в момент возникновения ЧР. Таким образом, это величина заряда, которая может быть зафиксирована измерительным прибором, в отличие от истинного заряда, прошедшего внутри пробиваемого включения в момент ЧР. Название «кажущийся» связано с предположением о том, что эта характеристика не равна истинному заряду, нейтрализованному частичным разрядом. Однако принято считать, что эта величина косвенно отражает величину истинного заряда.

В гомогенных изоляционных материалах кажущийся заряд может служить показателем критических ЧР, приводящих к разрушению диэлектрика. Для этого проводят калибровочные измерения для каждого конкретного материала. В случае с углями такой подход не применим, поскольку следует ожидать большого разброса кажущегося заряда критических ЧР вследствие резкой неоднородности материала. Таким образом, для мониторинга триинга целесообразно ориентироваться на интенсивность ЧР и приложенное напряжение.

Триинг

В момент частичного разряда в пробиваемом включении горит разрядная плазма. Тепловой эффект плазмы приводит к нагреву включения до некоторой температуры, величина которой зависит от энергии ЧР. При повышении приложенного внешнего напряжения энергия ЧР также возрастает. Частичные разряды выше определенной энергии могут приводить к термодеструкции материала вокруг пробиваемого включения. Такие частичные разряды называют критическими. Для углеродсодержащих материалов действие критических ЧР

приводит к карбонизации (обугливанию) вещества, результатом чего становится понижение электрического сопротивления. В ряде случаев этот процесс происходит по цепочке и приводит к образованию низкоомных треков - дендритов [114], (рисунок 4.13). Этот процесс называется триингом.

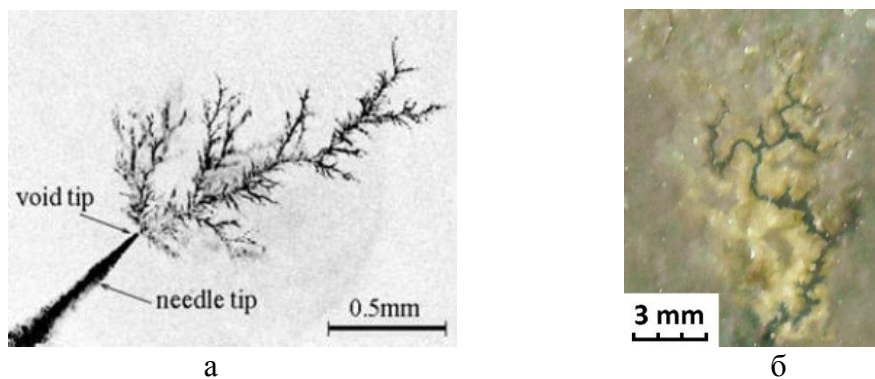


Рисунок 4.13 – Дендриты: пример дендрита в полиэтилене (а) и горючих твердых топливах (б)

Рост дендритов может начинаться как от электрода, так и от включения. В первом случае дендрит удлиняется преимущественно в направлении электрода противоположной полярности, а во втором случае дендриты могут удлиняться в обоих направлениях по направлению к электродам. Скорость роста дендритов, т.е. интенсивность триинга зависит от материала и степени его чистоты. В изоляционных изделиях триинг является негативным явлением, приводящим к выходу из строя оборудования. Если дендрит замыкает межэлектродное расстояние, происходит сквозной пробой и формирование низкоомного канала между электродами.

Процесс триинга сопровождается непрерывным действием частичных разрядов, которые могут быть зарегистрированы измерительными приборами, подключенными ко внешней цепи. Непосредственное влияние на удлинение дендритов оказывают только критические ЧР.

Подготовка образцов для измерений

Измерение характеристик частичных разрядов и напряжения триингового пробоя необходимо для оценки потенциала применения этих явления для создания технологии подземного пиролиза. Так, низкая напряженность возникновения ЧР и низкое напряжение триингового пробоя свидетельствуют о возможности произвести пробой значительного межэлектродного расстояния при технически реализуемом значении напряжения.

Образцы для измерений характеристик ЧР изготавливались в виде брусков (рисунок 4.14) путем вырезания из цельного фрагмента угля на камнерезном станке абразивно-отрезным диском с алмазным покрытием. Длина бруска выбиралась исходя из требуемого межэлектродного расстояния так, чтобы от электрода до края бруска оставалось не менее

30 мм. Из углей всех исследуемых месторождений были изготовлены образцы с протяженностью межэлектродного расстояния от 5 см до 30 см. Ширина и высота бруска выбирались в диапазоне 30-50% от длины.

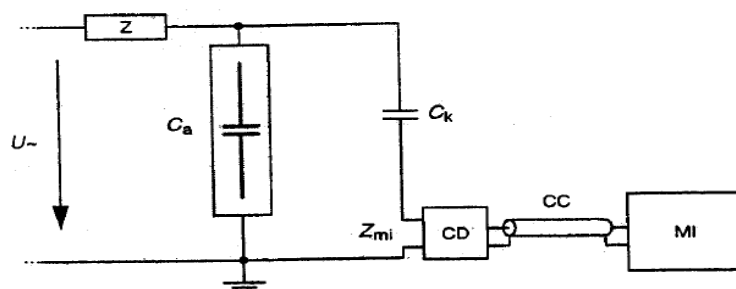


Рисунок 4.14 – Образец угля с установленными электродами для измерения характеристик ЧР

Для подачи напряжения использовались стержневые электроды, поскольку такая электродная конфигурация является уменьшенной моделью предполагаемой технологии пробоя и нагрева подземного угольного пласта. В качестве электродов использовались стержни из углеродистой стали толщиной 10 мм, которые плотно вставлялись в предварительно просверленные отверстия. Электроды углублялись в образец на 60-80% высоты образца.

Аппаратура и методика измерений

Методика измерений характеристик частичных разрядов регламентирована рядом нормативных документов [115,116]. Измерение проводится путем подачи высокого напряжения промышленной частоты на образец и регистрации импульсов тока или напряжения во внешней цепи. Поскольку импульсы тока ЧР имеют более высокочастотный спектр, для их замыкания параллельно испытываемому образцу включается так называемый соединительный конденсатор. Также в цепь включается регистрирующее устройство. В зависимости от положения регистрирующего устройства в цепи, международный стандарт МЭК 60270 предлагает три варианта измерительных схем. В первом случае (рисунок 4.15) регистрирующее устройство включается последовательно с соединительным конденсатором.

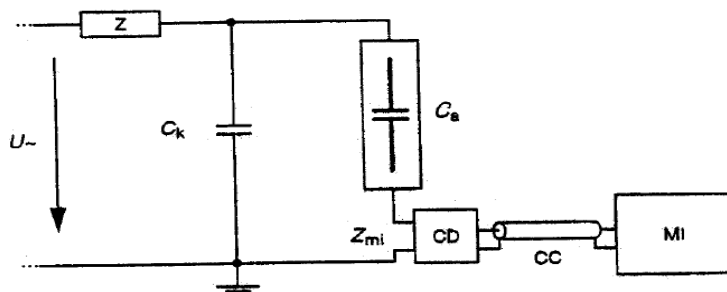


$U_{\sim}$ - входное напряжение, Z - блокирующий импеданс, C_a - испытуемый образец, C_k - соединительный конденсатор, Z_{mi} - импеданс регистрирующего устройства, CD - регистрирующее устройство, CC - соединительный кабель, MI - измерительный прибор

Рисунок 4.15 – Измерительная схема с последовательным соединением соединительного конденсатора и регистрирующего устройства

К преимуществам этой схемы относится безопасность измерительного прибора. В случае непредвиденного пробоя испытуемого образца измерительный прибор не подвергается действию высокого напряжения. К недостаткам схемы относится сравнительно невысокая чувствительность.

Во втором варианте регистрирующее устройство последовательно включается с испытуемым образцом (рисунок 4.16).



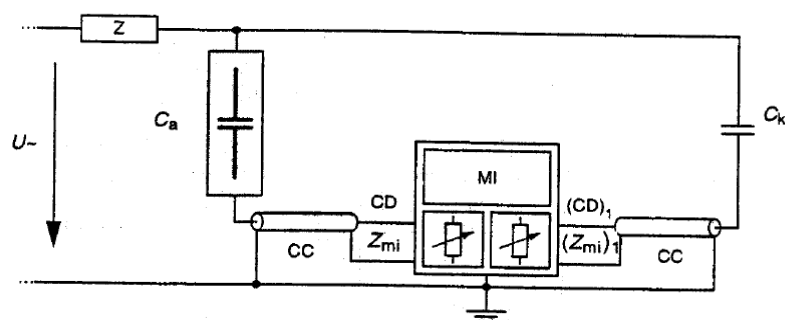
$U_{\sim}$ - входное напряжение, Z - блокирующий импеданс, C_a - испытуемый образец, C_k - соединительный конденсатор, Z_{mi} - импеданс регистрирующего устройства, CD - регистрирующее устройство, CC - соединительный кабель, MI - измерительный прибор

Рисунок 4.16 – Измерительная схема с последовательным соединением испытуемого образца и регистрирующего устройства

К преимуществам этой схемы относится более высокая чувствительность, чем в первом случае, поскольку регистрирующее устройство измеряет ток ЧР непосредственно, а не косвенно, как в предыдущем случае. К недостаткам схемы относится опасность повреждения

измерительного прибора, так как в случае непредвиденного пробоя испытуемого образца измерительный прибор подвергается действию высокого напряжения.

Третий вариант измерительной схемы, предлагаемый стандартом МЭК 60270, представляет собой мостовое включение соединительного конденсатора, испытуемого образца и двух регистрирующих устройств (рисунок 4.17).



$U_{\sim}$ - входное напряжение, Z - блокирующий импеданс, C_a - испытуемый образец, C_k - соединительный конденсатор, Z_{mi} - импеданс регистрирующего устройства, CD - регистрирующее устройство, CC - соединительный кабель, MI - измерительный прибор

Рисунок 4.17 – Измерительная схема с мостовым включением

Измерительный прибор в этом случае измеряет дифференциальный сигнал с регистрирующих устройств. Эта схема обладает наибольшей чувствительностью. Однако для ее корректной работы необходимо точное соблюдение условий балансировки. В их число входят исключительно емкостная реакция измерительного образца, причем емкость не должна зависеть от приложенного напряжения; емкость соединительного конденсатора должна в точности равняться емкости испытуемого образца. Также измерительные тракты должны быть абсолютно идентичны. Наибольшим недостатком этой схемы является необходимость балансировки. Также, остается вероятность повреждения измерительного прибора в случае пробоя образца.

В нашем случае для проведения измерений была выбрана вторая схема. Мостовая схема не пригодна для измерений в случае с углем, поскольку из-за наличия у угля объемной проводимости, схему не удастся сбалансировать соединительным конденсатором. Первая же схема обладает меньшей чувствительностью по сравнению со второй.

Электрическая схема силовой и измерительной частей установки приведена на рисунке 4.18.

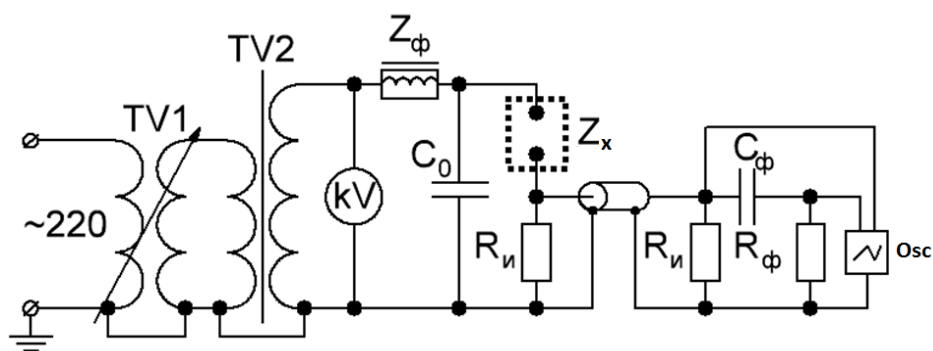


Рисунок 4.18 – Электрическая схема лабораторной установки для исследования характеристик частичных разрядов

Установка получает питание от электрической сети переменного напряжения 220 В. Это напряжение поступает на регулирующий трансформатор TV1, в качестве которого используется изделие марки РОТМ-100/0,5 УХЛ4 (рисунок 4.19). Этот регулятор номинальной мощностью 100 кВА работает как трансформатор с переменной магнитной связью. Напряжение на его выходе может изменяться от 10 В до 220 В путем перемещения каретки, размещенной внутри трансформатора. Каретка приводится в движение с помощью червячного механизма и трехфазного электродвигателя.



Рисунок 4.19 – Регулировочный трансформатор РОТМ-100/0,5

Напряжение с выхода регулятора подается на повышающий трансформатор TV2 марки ИОМ-100/100 (рисунок 4.20). Этот трансформатор номинальной мощностью 100 кВА выдает напряжение 100 кВ при напряжении на входе 220 В. Напряжение на выходе трансформатора TV2 контролируется с помощью цифрового киловольтметра КВЦ-120.



Рисунок 4.20 – Повышающий трансформатор ИОМ-100/100

Элемент Z_{ϕ} используется в качестве блокирующего импеданса. Он не позволяет высокочастотным помехам из питающей сети и трансформаторов поступать в измерительную схему. Также он способствует тому, чтобы импульсы тока ЧР замыкались в контуре между образцом и соединительным конденсатором. В качестве Z_{ϕ} используется высокоиндуктивный проволочный резистор марки ПЭВР-100 с номинальным сопротивлением 1 кОм. Резистор имеет форму трубки, и для увеличения его индуктивности внутрь был помещен набор ферритовых шайб марки М2000.

Емкость C_0 выполняет в схеме функцию соединительного конденсатора. Через эту емкость замыкается высокочастотный импульс тока частичных разрядов. В качестве C_0 используется набор из включенных последовательно 5 керамических конденсаторов марки КВИ-3 16 кВ и емкостью 220 пФ. Суммарная номинальная емкость батареи составляет 44 пФ, максимальное допустимое напряжение – 80 кВ. Емкость соединительного конденсатора, согласно международному стандарту МЭК 60270, выбирается близкой к межэлектродной емкости исследуемого образца.

Элемент Z_x представляет собой испытуемый образец. Два резистора, обозначенные в схеме как $R_{и}$, выполняют функцию датчиков тока, с помощью которых фиксируются импульсы частичных разрядов. Физически измерительный прибор (осциллограф) удален на несколько метров от образца, находящегося под высоким напряжением. Источник сигнала соединен с приемником сигнала экранированным кабелем. Для исключения возникновения помех в кабельной линии, она должна быть согласована путем подключения с обоих концов резисторов с сопротивлением, равным волновому сопротивлению кабеля. В данном случае эти резисторы одновременно выполняют функцию измерительного шунта $R_{и}$. Сопротивление каждого из них составляет 150 Ом.

Сигнал с выхода измерительного шунта проходит через фильтр нижних частот, для того, чтобы отделить ток объемной проводимости образца частотой 50 Гц от тока частичных разрядов, частотный спектр которых лежит в диапазоне десятков-сотен мегагерц. На измерительный прибор поступают два сигнала – непосредственно с шунта и с выхода фильтра.

Установка управляется с помощью пульта, позволяющего изменять подаваемое на образец напряжение и имеющего схемы защиты и измерения (рисунок 4.21).



Рисунок 4.21 – Пульт управления измерительной установкой

В качестве измерительного прибора для регистрации и обработки сигналов нами использовались многофункциональная осциллографическая станция Tektronix TDS 7104 и осциллограф Agilent DSO-X 2014A (рисунок 4.22 а,б).



а



б

Рисунок 4.22 – Осциллографическая станция Tektronix TDS 7104 (а) и осциллограф Agilent DSO-X 2014A (б)

Основные характеристики Tektronix TDS 7104 приведены ниже:

- | | |
|----------------------------|--------------------------|
| - граничная частота | 4 ГГц |
| - частота работы АЦП | 20 гигавыборок в секунду |
| - размер встроенной памяти | 32 Мб |

- максимальная скорость захвата данных 400 000 осциллограмм в секунду
- временное разрешение 1 пс
- количество каналов 4
- операционная система MS Windows

Устройство способно в режиме реального времени производить любую математическую обработку поступающих сигналов, включая интегрирование, дифференцирование и разложение в ряд Фурье. Математический аппарат и возможность сохранения большого количества данных позволяют использовать этот осциллограф для определения интенсивности ЧР.

Основные характеристики осциллографа Agilent DSO-X 2014A:

- граничная частота 100 МГц
- частота работы АЦП 2 гигавыборки в секунду
- глубина памяти 100 киловыборок
- максимальная скорость захвата данных 50 000 осциллограмм в секунду
- количество каналов 4
- вертикальная погрешность 0,25%

Низкий уровень собственных шумов и высокая точность этого осциллографа позволяют зарегистрировать импульсы частичных разрядов на самых ранних стадиях их появления.

Напряжение и напряженность возникновения частичных разрядов

Образцы углей под действием высокого напряжения проявляют емкостно-резистивную реакцию с преобладанием резистивной составляющей (рисунок 4.23). Сдвиг фаз между током и напряжением составляет 15-20 градусов. Фаза ЧР в момент их появления соответствует амплитуде протекающего тока. По мере увеличения напряжения диапазон фаз ЧР расширяется.

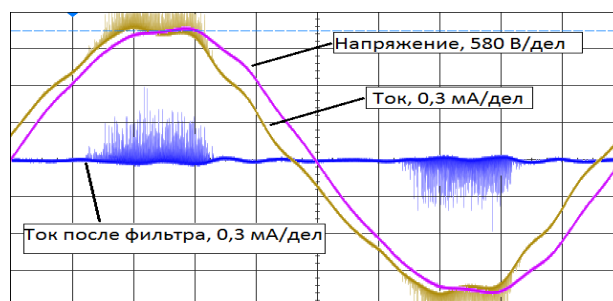
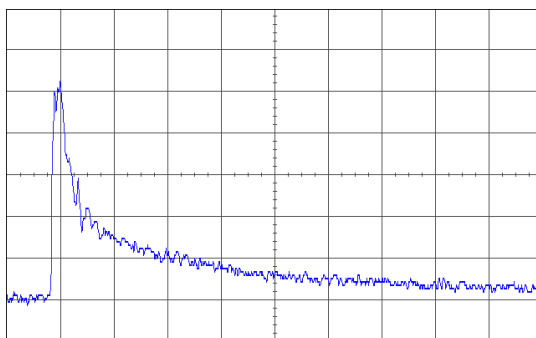


Рисунок 4.23 – Осциллограммы напряжения и тока через образец
(масштаб по горизонтали 2 мс/дел)

Импульсы тока частичных разрядов имеют длительность фронта 5-10 нс (рисунок 4.24). Именно это время развиваются плазменные процессы в газовой поре. Далее следуют экспоненциальный спад, свидетельствующий о процессе перезаряда емкости поры.



Масштаб горизонтальной оси 100 нс/дел, вертикальной оси – 27 мкА/дел

Рисунок 4.24 – Осциллограмма тока единичного ЧР

Напряжение возникновения ЧР $U_{\text{воз}}$ – это наименьшее напряжение, при котором появляются частичные разряды. Можно предположить, что чем меньшее напряжение требуется для возникновения ЧР, тем при меньшем напряжении начнет развиваться тринг и произойдет пробой. Поэтому по величине напряжения возникновения косвенно можно судить о напряжении пробоя. При приложении напряжения к реальному подземному пласту знание такой корреляции может быть полезным.

На рисунке 4.25 а показана зависимость напряжения возникновения частичных разрядов $U_{\text{воз}}$ от расстояния между электродами l . Для рассматриваемых углей расхождение значений $U_{\text{воз}}$ достигает 2 крат, что связано с разной величиной пористости и разным составом минеральной составляющей углей.

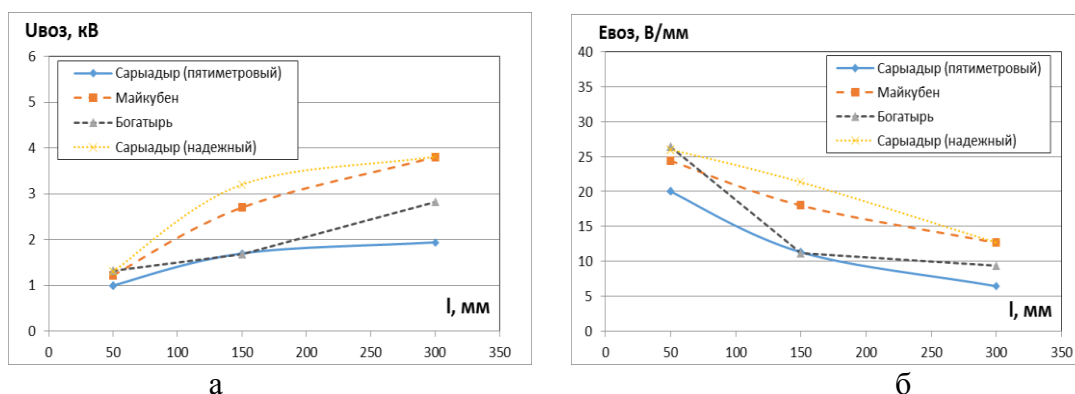


Рисунок 4.25 – Напряжение (а) и напряженность (б) возникновения ЧР в углях в зависимости от расстояния

Видно, что с увеличением межэлектродного расстояния напряжение возникновения увеличивается. Это связано с тем, что при том же напряжении, но большем межэлектродном расстоянии, средняя напряженность поля будет меньше. Однако представляет интерес также то, как зависит от межэлектродного расстояния средняя напряженность возникновения $E_{\text{воз}}$ (рисунок 4.25 б), которая определялась следующим образом:

$$E_{\text{воз}} = \frac{U_{\text{воз}}}{l} \quad (4.5)$$

Видно, что при увеличении межэлектродного расстояния уменьшается средняя напряженность, при которой появляются частичные разряды. Это свидетельствует о том, что напряжение возникновения зависит от расстояния нелинейно. Экстраполируя графики в область больших расстояний можно предположить, что $E_{\text{воз}}$ продолжит снижаться и далее, то есть $U_{\text{воз}}$ будет возрастать медленнее при увеличении межэлектродного расстояния.

Триинг и триинговый пробой углей

Напряжение $U_{\text{пр}}$ и напряженность $E_{\text{пр}}$ (рисунок 4.26) пробоя характеризуют 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 этой плазмы вызывает термодеструкцию и карбонизацию контактирующего с ним угольного вещества, в результате чего сопротивление межэлектродного участка сохраняет свое низкое значение даже после отключения напряжения.

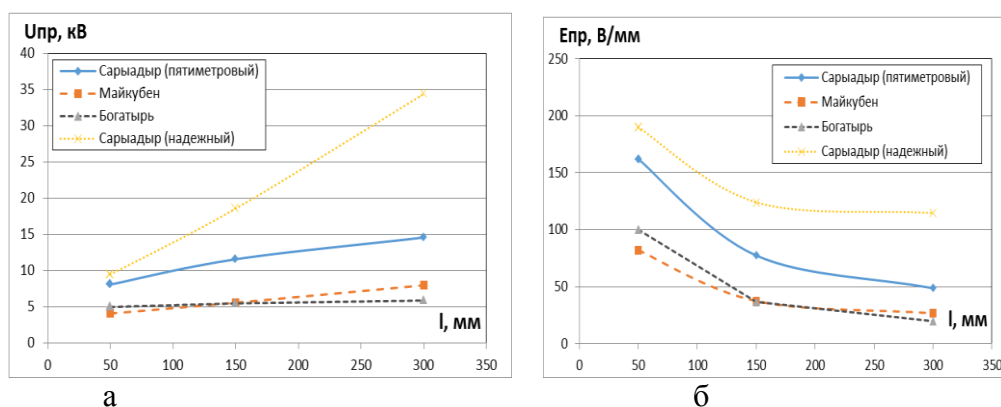


Рисунок 4.26 – Напряжение (а) и напряженность (б) пробоя угля в зависимости от расстояния

Характер поведения кривых $U_{\text{пр}} = f(l)$ и $E_{\text{пр}} = f(l)$ весьма похож на зависимости $U_{\text{воз}} = f(l)$ и $E_{\text{воз}} = f(l)$ соответственно, однако пробой происходит при напряжениях, в несколько раз превышающих напряжение возникновения частичных разрядов. Здесь также видно, что, в отличие от однородных диэлектриков, в углях при увеличении межэлектродного расстояния

значительно снижается средняя напряженность пробоя. Характер кривой позволяет предположить, что при дальнейшем увеличении межэлектродного расстояния напряжение пробоя будет возрастать слабо. В результате, для пробоя межэлектродных расстояний в десятки метров в условиях реального подземного пласта, возможно, потребуется технически реализуемое в полевых условиях напряжение.

Корреляция между напряжением возникновения ЧР и напряжением пробоя может быть также полезная в полевых условиях. Зная, во сколько раз напряжение пробоя превышает напряжение возникновения ЧР для данных углей, зафиксировав $U_{\text{воз}}$ можно прогнозировать $U_{\text{пр}}$ при данном межэлектродном расстоянии.

Тепловое поле образца при пробое

К моменту пробоя обычно происходит нагрев образца до температуры 100-150°C (рисунок 4.27). Причиной нагрева являются ток объемной проводимости образца и плазмы частичных разрядов.

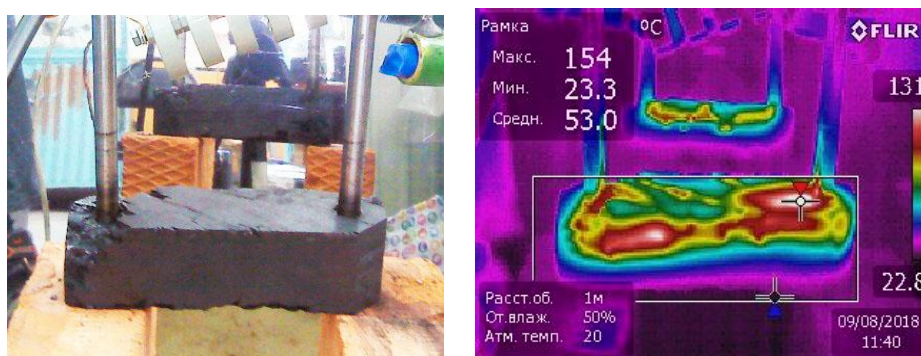
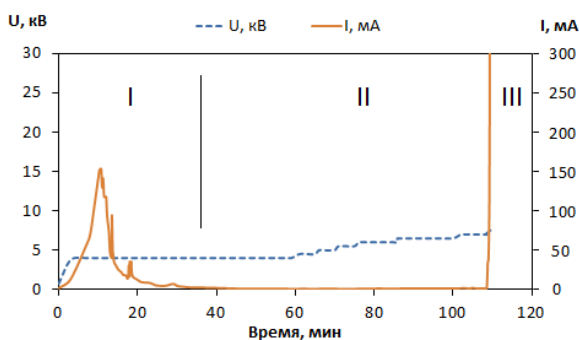


Рисунок 4.27 – Тепловое поле образца при пробое

До начала приложения напряжения в углях присутствует собственная влага, которая может находиться в свободном или сорбированном состоянии. Эта влага увеличивает объемную проводимость из-за образования ионов. Вследствие этого ток объемной проводимости может приводить к предварительному нагреву образца. В диапазоне температур 100-150°C эта влага переходит в газообразное состояние, и нагрев прекращается. Для примера на рисунке 4.28 показана типичная зависимость тока и напряжения на образце при приложении высокого напряжения. В начальные моменты времени могут присутствовать всплески тока, вызванные наличием объемной проводимости. Далее, когда температура образца превысила 100°C, влага начинает дрейфовать из области нагрева в окружающее пространство, и ток снижается. В следующей фазе присутствует лишь малый ток, обусловленный наличием частичных разрядов. В это время происходит рост разрядных структур в межэлектродном

пространстве. Интенсивность протекания этого процесса зависит от приложенного напряжения – с увеличением напряжения продолжительность этой фазы уменьшается.



стадия I – ионный ток; стадия II – ток объемной проводимости и частичных разрядов; стадия III – пробой образца

Рисунок 4.28 – Типичная зависимость тока и напряжения на образце от времени

Когда разрядные структуры перекрывают межэлектродное расстояние, сопротивления межэлектродного участка снижается за счет возникновения сквозного низкоомного канала.

Выводы по главе 4

1. Исследование электрофизических свойств углей в зависимости от частотных характеристик электроразрядных явлений в углях показывает, что с точки зрения электрофизических свойств рассматриваемые угли месторождения Сарыадыр (надежный), Сарыадыр (пятиметровый), Богатырь и Майкубен. являются слабопроводящими материалами с выраженной поляризационной способностью.

2. Высокая величина диэлектрической проницаемости свидетельствует о наличии влаги. Таким образом, электропроводность имеет как электронную, так и ионную компоненты. Тангенс угла потерь в диапазоне частот до 1 МГц весьма незначителен.

3. 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 значительных межэлектродных расстояний. Зависимости напряжения возникновения ЧР и напряжения пробоя от межэлектродного расстояния коррелируют между собой, что может быть использовано для прогнозирования напряжения пробоя в полевых условиях.

Глава 5 Физическое моделирование и опытные испытания подземного нагрева углей

5.1 Описание установки для физического моделирования подземного нагрева

Внутрипластовая конверсия твердых топлив предполагает нагрев породы непосредственно в условиях залегания. Для лабораторных исследований производилась имитация условий подземного пласта для образца твердого топлива. Имитировались такие критерии подобия, как пластовое давление и напряженность электрического поля. Структурная схема установки показана на рисунке 5.1.

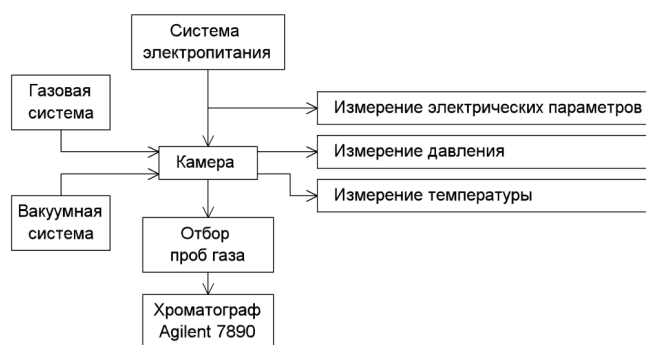


Рисунок 5.1 – Структурная схема установки

Пластовое давление представляет собой давление текучей фазы пласта и, как правило, для определенной глубины равно гидростатическому давлению столба соответствующей высоты. Имитация пластового давления проводилась повышенным давлением буферного газа в камере лабораторной установки (рисунок 5.2). В качестве буферного газа использовался азот. Камера имеет объем 0,06 м³ и максимальное давление 10 кгс/см², что позволяет имитировать пластовое давление на глубине 100 м. Газ подавался в камеру из баллонов через редуктор. Предварительно из камеры форвакуумным насосом откачивался воздух. Это позволяет исключить воспламенение пиролизных газов в камере в процессе эксперимента. Использовался роторно-пластинчатый форвакуумный насос LB 60, имеющий величину остаточного давления 0,005 мбар.



Рисунок 5.2 – Камера опытной установки

Система электропитания экспериментальной установки представлена набором сильноточных и высоковольтных электронных и электротехнических устройств, объединенных в общую схему и управляемых с единого пульта (рисунок 5.3).

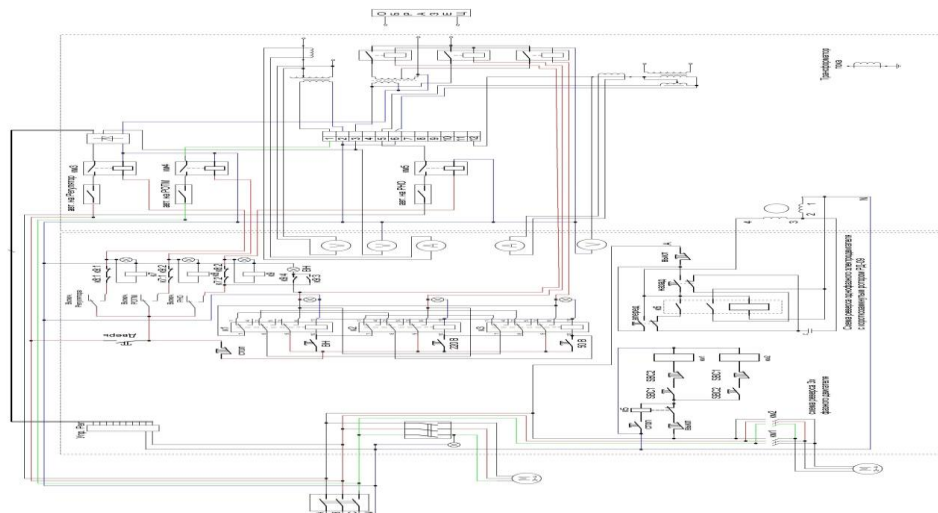


Рисунок 5.3 – Электрическая схема экспериментальной установки

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

В процессе эксперимента измеряется динамика температуры в определенных точках образца для построения картин динамики теплового поля и сравнения экспериментальных результатов с расчетными данными. Для этой цели использовался многоканальный термопреобразователь Термодат 25М5 и набор термопар хромель-копель.

В ходе и после завершения эксперимента производится отбор и анализ проб газа из камеры. Отбор проб газа производится непосредственно из камеры и через пневмошланг поступает на фильтр-регулятор LFR-1/4-D-5M-MINI. Это устройство позволяет отбирать пробу газа, не оказывая влияние на давление в камере, а также удаляет из газа аэрозольную фазу и пылевые частицы. После фильтра-регулятора газ поступал на хроматограф Agilent 7890, с помощью которого производился анализ получаемого пиролизного газа. Использовались пневмошланги, запорная арматура и газовая оснастка производства компании Festo (Германия).

Хроматограф оснащен капиллярной колонкой ShinCarbon ST 100/120, длиной 2 м и внутренним диаметром 1 мм. Эта колонка предназначена для разделения следующих газов: водород, кислород, азот, монооксид и диоксид углерода, метан и более тяжелые углеводороды. На колонке используется детектор по теплопроводности.

Нагреву подвергались образцы углей в форме параллелепипеда, вырезанные из цельного угольного фрагмента на камнерезном станке абразивно-отрезным диском с алмазным покрытием (рисунок 5.4).

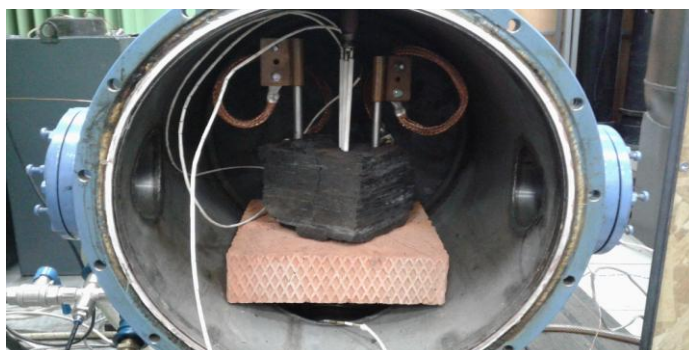
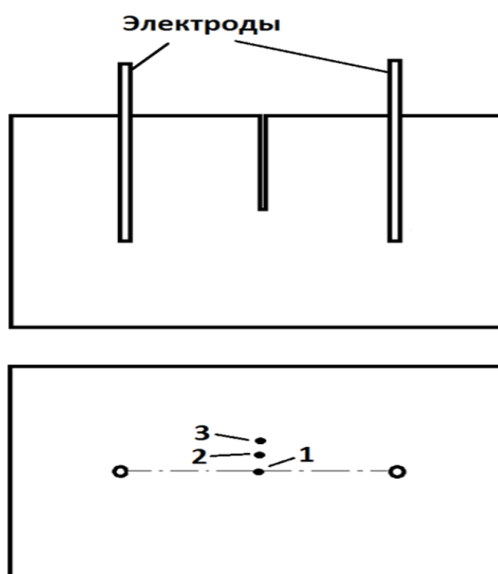


Рисунок 5.4 – Образец углей в камере опытной установки

В качестве электродов использовались стержни из углеродистой стали толщиной 10 мм, расположенные на расстоянии 200 мм друг от друга и углубленные в образец на ~100 мм. Температура измерялась в 3-х точках. Первая точка располагалась в центре межэлектродного расстояния. Вторая и третья точки удалены от оси, проведенной между электродами, на 30 мм и 60 мм соответственно (рисунок 5.5).



1, 2, 3 – точки размещения термопар

Рисунок 5.5 – Схема размещения термопар в образце

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 грибкового уплотнения и обеспечивают герметичность камеры. После герметизации и вакуумирования, камера заполнялась азотом до рабочего давления, которое в эксперименте составляло 2 кгс/см^2 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 сильноточный режим работы, и производится нагрев образца пропусканием тока через канал пробоя. По мере нагрева выделяющийся газ смешивается с азотом. Для поддержания постоянного давления в камере выделение газа компенсируется сбросом избыточного давления через газовый ввод камеры. Таким образом, выделяющийся пиролизный газ постепенно замещает азот. 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 $\sim 600 \text{ Вт}$.

На рисунке 5.6 приведены зависимости температуры в измеряемых точках в зависимости от времени нагрева для образца угля Богатырь. Термограммы остальных образцов идентичны.

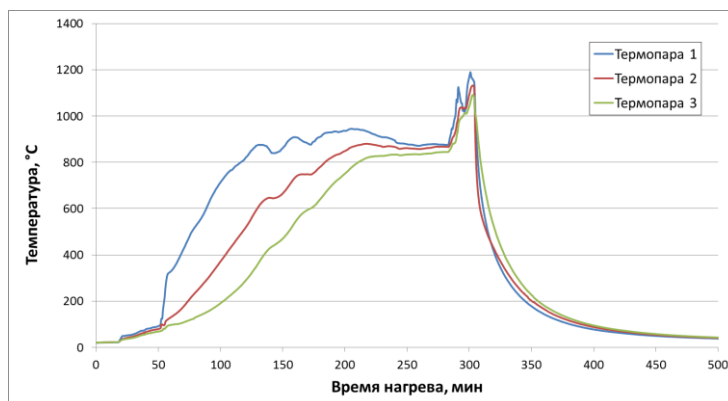


Рисунок 5.6 – Зависимости температуры от времени нагрева

Скорость нагрева не постоянна в течение всего времени нагрева и варьируется при изменении сопротивления образца. По мере нагрева образца его сопротивление снижается, и для поддержания заданной мощности необходимо увеличивать ток. Нагрев образца производился до того момента, пока требуемый для нагрева ток не превысит 130 А . Далее эксперимент останавливали, поскольку электрические вводы камеры не способны пропускать больший ток. До и после нагрева производился замер массы образца для вычисления потери массы. Объем выделившегося газа определялся с помощью мембранного газового счетчика с автоматической термокомпенсацией. Количество выделившейся жидких продуктов непосредственно определить невозможно, поскольку смолистые вещества оседают на всей

внутренней поверхности камеры. Таким образом, массу жидких продуктов определяли вычитанием массы газа из общей потери массы образца. Массу газа определяли расчетным путем по известному составу и объему.

Богатырь

Для нагрева использовался образец с начальной массой 5,59 кг.

Потеря массы образца за время нагрева составила 568 г, из них 307 г жидких продуктов. Объем выделившегося газа составил 0,764 м³.

На нагрев затрачено 4,54 кВт·ч электроэнергии.

Майкубен

Для нагрева использовался образец с начальной массой 5,07 кг.

Потеря массы образца за время нагрева составила 912 г, из них 396 г жидких продуктов. Объем выделившегося газа составил 1,066 м³.

На нагрев затрачено 1,94 кВт·ч электроэнергии.

Сарыадыр (пятиметровый)

Для нагрева использовался образец с начальной массой 4,32 кг.

Потеря массы образца за время нагрева составила 474 г, из них 299 г жидких продуктов. Объем выделившегося газа составил 0,432 м³.

На нагрев затрачено 3,39 кВт·ч электроэнергии.

Сарыадыр (надежный)

Для нагрева использовался образец с начальной массой 4,19 кг.

Потеря массы образца за время нагрева составила 206 г, из них 133 г жидких продуктов. Объем выделившегося газа составил 0,175 м³.

На нагрев затрачено 0,78 кВт·ч электроэнергии. Сводные данные по экспериментальным исследованиям приведены в таблице 1.

Таблица 5.1 – Сводные данные по физическому моделированию подземного нагрева углей

Параметры	Образец			
	Богатырь	Майкубен	Сарыадыр (надежный)	Сарыадыр (пятиметровый)
1	2	3	4	5
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

Продолжение таблицы 5.1

1	2	3	4	5
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 и определяли на газовом хроматографе, марки «Agilent 7890 А» с детектором ПИД, погрешность измерений $\pm 5\%$. Результаты анализа и калорийность полученного газа приведены в таблице 5.2

Таблица 5.2 – Состав и калорийность пиролизного газа, полученного из углей месторождения Майкубен, Богатырь, Сарыадыр (пятиметровый), Сарыадыр (надежный).

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)

5.2 Механизм роста проводящих дендритов при триинге

В зависимости от материала диэлектрика и его молекулярной структуры дендриты могут быть проводящими и непроводящими [117,118]. В случае непроводящих дендритов триинг происходит вследствие повышенной напряженности внутри самого дендрита. Основная часть ЧР сосредоточена в области основания дендрита. ЧР имеют сравнительно большой кажущийся заряд, который возрастает при удлинении дендрита. Удлинение структуры в этом случае происходит тогда, когда стримеры разряда достигают острей дендрита. При этом образуется

полая канальная структура с диэлектрическими стенками. В этом случае интенсивность частичных разрядов ослабевает по мере роста и ветвления структуры.

В случае проводящих дендритов, образующихся при триинге в твердых топливах, удлинение структуры происходит вследствие повышенной напряженности в материале вблизи острий дендритов. ЧР действуют преимущественно на остриях ветвей дендрита и удлиняют его тепловым действием частичного разряда. ЧР имеют сравнительно низкий кажущийся заряд, который практически не зависит от размера дендрита. Структура удлиняется быстрее, чем в случае непроводящих дендритов. По мере роста и ветвления дерева интенсивность ЧР возрастает. Канальная структура в этом случае покрыта низкоомным слоем продуктов термодеструкции диэлектрика [117].

На основании проведенных ранее исследований экспериментов по пробою твердых топлив, нами сделаны следующие наблюдения особенностей электрической деградации этого материала. При неизменной величине приложенного напряжения рост дендритов происходит некоторое время, после которого интенсивность частичных разрядов снижается. При повышении напряжения интенсивность ЧР вновь повышается и продолжается некоторое время, после чего снова снижается. Такое поведение связано с тем, что изменение напряжения на электродах будет влиять на величину поля, сконцентрированного на острие дендрита. В фундаментальной работе [119] представлена формула, описывающая максимальная напряженность поля на острие электрода в электродной системе острие-плоскость:

$$E = \frac{2V}{r \ln\left(1 + \frac{4d}{r}\right)} \quad (5.1)$$

В случае с проводящими дендритами напряженность на острие дендрита будет высока аналогично напряженности на острие в электродной системе острие-плоскость (рисунок 5.7). Частичные разряды возникают на острие дендрита как пробой небольшого фрагмента в той части материала, где концентрация поля чрезвычайно высока и превышает электрическую прочность породы.

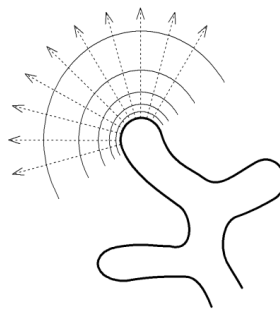


Рисунок 5.7 – Концентрация поля вблизи головки дендрита

Благодаря этому механизму напряжение триингового пробоя существенно ниже, чем напряжение мгновенного электрического пробоя на постоянном или импульсном напряжении. Можно предположить, что максимальная напряженность на головке дендрита велика и при росте дендрита поддерживается на том постоянном уровне, который достаточен для пробоя окружающих участков и дальнейшего удлинения дендрита.

Когда поле вблизи острия превышает электрическую прочность породы, происходит электрический пробой фрагмента породы вблизи острия, то есть происходит частичный разряд. Предположим, что электрическая прочность породы приблизительно постоянна во всех ее точках, а частичный разряд происходит, когда максимальное поле на головке E превышает некоторую величину, называемую в аналогичных моделях критическим полем $E_{кр}$ [120].

Таким образом, исходя из формулы (5.1), ЧР начнут возникать при напряжении на электродах:

$$V = \frac{E_{кр}}{2} r \ln\left(1 + \frac{4d}{r}\right) \quad (5.2)$$

Таким образом, с помощью формулы (5.2) мы получаем зависимость напряжения на электродах, при котором будет происходить устойчивое возникновение частичных разрядов и развитие триинга, от расстояния d при заданном значении критического поля $E_{кр}$ и радиусе головки r . Если считать, что при выполнении этого условия будет происходить развитие триинга и в итоге возникать триинговый пробой, можно считать (5.2) зависимостью напряжения пробоя от межэлектродного расстояния.

Радиус головки дендрита зависит от структуры и состава материала. Полагаем, что для одной породы он является величиной приблизительно постоянной. Например, для горючих сланцев средний радиус, согласно результатам растровой электронной микроскопии, составляет приблизительно 5 мкм (рисунок 5.8)



Рисунок 5.8 – Пример дендрита

В углях растровая микроскопия не позволяет наблюдать дендриты, поскольку практически нет цветового различия между материалом углей и материалом дендрита.

Аппроксимация экспериментальных данных.

Теоретически формула (5.2) должна описывать напряжение триингового пробоя в зависимости от межэлектродного расстояния. Однако на практике уголь является весьма неоднородным материалом с переменным составом и структурой. Поэтому не следует ожидать выполнения этого закона в точности. Можно, однако, предположить, что напряжение пробоя зависит от расстояния по логарифмическому закону. Это предположение подтверждено нами на практике на твердых топливах десятка месторождений в диапазоне межэлектродных расстояний до 0,6 м. В связи с этим предположением, полученные ранее экспериментальные данные были аппроксимированы по логарифмическому закону, сходному по форме с формулой (5.2). На рисунке 5.9 точками показаны экспериментальные данные напряжения пробоя от расстояния, а линиями – их аппроксимации по логарифмическому закону.

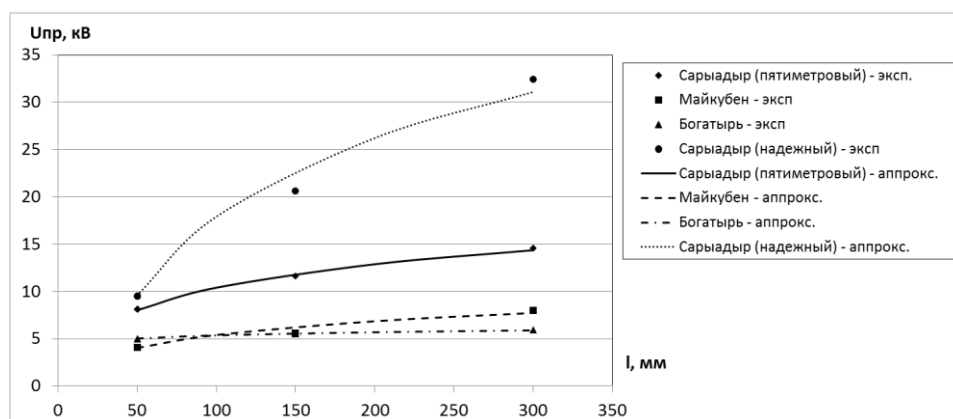


Рисунок 5.9 – Напряжение пробоя углей в зависимости от расстояния, экспериментальные данные и их аппроксимации по логарифмическому закону

Аппроксимация проведена методом наименьших квадратов. В результате аппроксимации получены следующие логарифмические функции для напряжения пробоя в зависимости от расстояния:

$$U_{\text{пр}} = 3750 \ln(1 + 150l) \quad \text{– напряжение пробоя углей Сарыадыр (пятиметровый);}$$

$$U_{\text{пр}} = 2250 \ln(1 + 100l) \quad \text{– напряжение пробоя углей Майкубен;}$$

$$U_{\text{пр}} = 480 \ln(1 + 700000l) \quad \text{– напряжение пробоя углей Богатырь;}$$

$$U_{\text{пр}} = 12000 \ln(1 + 10000l) - 65000 \quad \text{– напряжение пробоя углей Сарыадыр (надежный).}$$

Аналитические значения функций аппроксимации позволяют сделать экстраполяцию зависимости и получить значения напряжения пробоя для больших значений межэлектродного расстояния. На рисунке 5.10 показаны графики найденных функций до межэлектродного расстояния 5 метров.

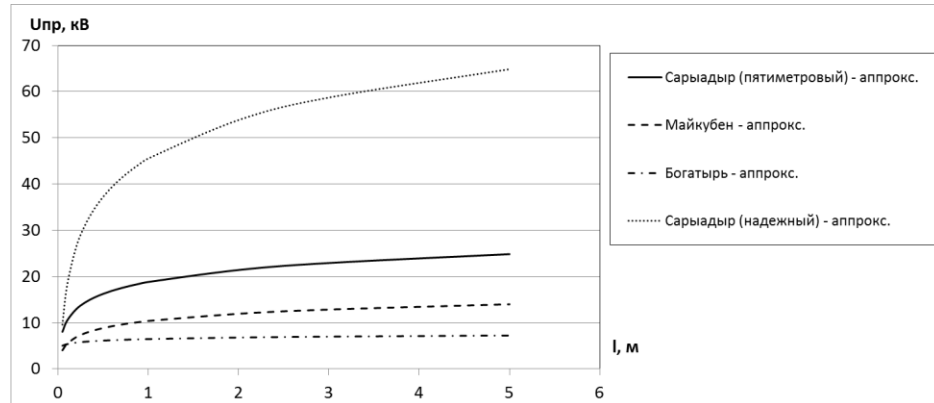


Рисунок 5.10 – Экстраполяция полученных логарифмических функций в область больших расстояний

Видно, что напряжение пробоя 5 метров составляет 65 кВ для углей Сарыадыр (надежный), 25 кВ для углей Сарыадыр (пятиметровый), 14 кВ для углей Майкубе и 7 кВ для углей разреза Богатырь. На основании этих данных необходимо сформулировать требования к оборудованию для пробоя межэлектродного участка пласта. Учитывая опытный характер установки, а также с учетом возможных вариантов имеющегося в продаже оборудования, целесообразно определить требование к максимальному напряжению установки в 100 кВ.

На этапе пробоя не требуется большой ток, однако с учетом относительно высокой электропроводности углей, достигающих 10^{10} См/см , ток на этапе пробоя на образцах с межэлектродным расстоянием 0,5 м достигал 150 мА. Для требуемого расстояния в 1,5 м целесообразно заложить возможность развивать ток в 1 А.

Происходящие после пробоя образца процессы можно разделить на два участка. Сначала происходит формирование канала протекания тока (участок I на рисунке 5.11). Сопротивление образца на этом участке может периодически изменяться, что требует соответствующей подстройки напряжения и тока для поддержания вводимой мощности. На этапе II канал сформировался, здесь для нагрева требуется большой ток при относительно малом напряжении.

На этапе нагрева II (рисунок 5.11) от установки требуется обеспечить большой ток при относительно малом напряжении. Для образцов с межэлектродным расстоянием 0,5 м на этапе нагрева, когда сформировался канал, требовалось напряжение 30-50 В при токе 50-100 А.

Масштабируя указанные параметры на межэлектродное расстояние 1,5 м, следует заложить требование к установке обеспечивать ток до 250 А при напряжении не менее 200 В.

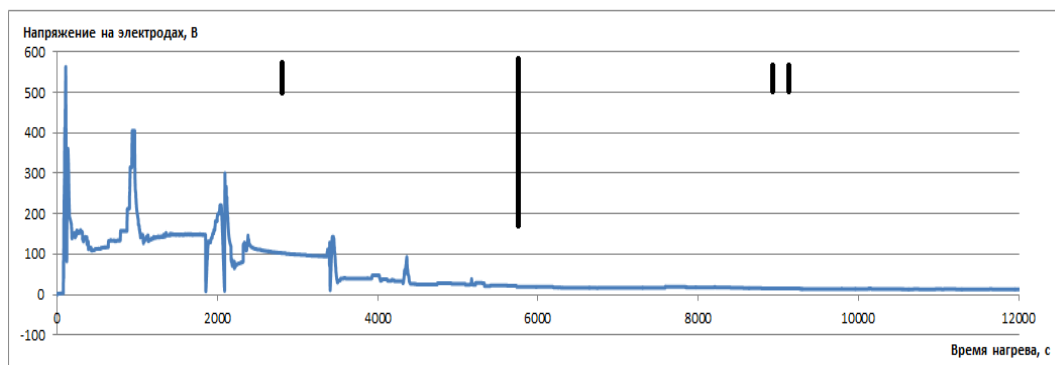


Рисунок 5.11 – Типичный график напряжения при нагреве предварительно пробитого образца: I – стадия формирования канала, II – стадия основного нагрева

Этап формирования канала I (рисунок 5.11) является промежуточным между этапами пробоя и нагрева. В этом режиме нужно обеспечить напряжение и ток промежуточных уровней. Исходя из опыта и экспериментальных данных, видится целесообразным выбрать напряжение до 6 кВ при токе до 20 А.

Исходя из полученных значений тока и напряжения, максимальная мощность оборудования на каждой стадии должна составлять не менее 100 кВт.

Экстраполяция закономерностей и данных, полученных в лабораторных исследованиях, позволяет сформулировать технические требования для опытной установки, предназначенной для испытания технологии в полевых условиях.

Таким образом, перечислим технические требования к оборудованию опытной установки:

Этап пробоя:

- | | |
|---------------------------|------------------|
| - частота | 50 Гц; |
| - максимальное напряжение | не менее 100 кВ; |
| - максимальный ток | не менее 1 А; |
| - максимальная мощность | не менее 100 кВА |

Этап формирования канала:

- | | |
|---------------------------|------------------|
| - частота | 50 Гц; |
| - максимальное напряжение | не менее 6 кВ; |
| - максимальный ток | не менее 20 А; |
| - максимальная мощность | не менее 100 кВА |

Этап нагрева:

- | | |
|---------------------------|------------------|
| - частота | 50 Гц; |
| - максимальное напряжение | не менее 200 В; |
| - максимальный ток | не менее 300 А; |
| - максимальная мощность | не менее 100 кВА |

5.3 Моделирование нагрева подземного угольного пласта электрическим током в канале пробоя

Как выше было описано, что в процессе карбонизации при нагреве угля углерод реагирует с водой, высокомолекулярные органические соединения, также при участии воды распадаются на более легкие низкомолекулярные. Жидкие продукты конверсии, называемые угольной смолой, представляют собой смесь жидких углеводородов, близкую по составу к природной нефти. Пиролизный газ на большую часть состоит из горючих компонентов, таких как водород, монооксид углерода, метан и, в небольших количествах, другие углеводородные газы.

Для нагрева угля непосредственно под землей исследователи предлагают ряд способов. Наиболее распространенным является подземная газификация за счет неполного сжигания угля [121-123]. Для этого в подземный реактор нагнетают окислитель, преимущественно воздух или паро-воздушную смесь. В результате окислительных и восстановительных реакций получают газ теплотворной способностью 4-8 МДж/м³, в котором основными горючими компонентами являются водород и монооксид углерода [121].

К ограничениям этого способа можно отнести высокое содержание в газе негорючих компонентов, главным образом азот и диоксид углерода. Как следствие, получаемый газ имеет низкую теплотворную способность, и в результате, узкую область применения. Основным продуктом такой технологии является газ. Угольная смола образуется в малых количествах и не используется как товарный продукт.

Другой подход заключается в нагреве внешним теплом, например, от электрического нагревателя. Если разместить нагреватели непосредственно в скважинах, прогреть удастся лишь ту часть угля, которая удалена от скважины не более чем на 2-3 метра. Прогрев более удаленной зоны требует больших временных затрат (более полугода) вследствие низкой теплопроводности угля.

Чтобы исключить этот недостаток, нужно иметь нагревательный элемент, проходящий по длине пласта. Одно из предложенных решений заключается в следующем. Между двумя скважинами создают канал гидроразрыва, который заполняют гранулами электропроводящего вещества, например, графита. Далее сформировавшийся путь протекания тока используют как электрический нагреватель [124, 125].

Предлагаемый в работе способ похож на вышеописанный, однако позволяет исключить большое количество дорогостоящих и технологически сложных подготовительных операций. Способ также заключается в нагреве подземного пласта электрическим током, однако в качестве нагревательного элемента используется канал электрического пробоя в самом

угольном пласте. Для пропускания тока через участок пласта необходимы две скважины, в которых размещаются электроды (рисунок 5.12).

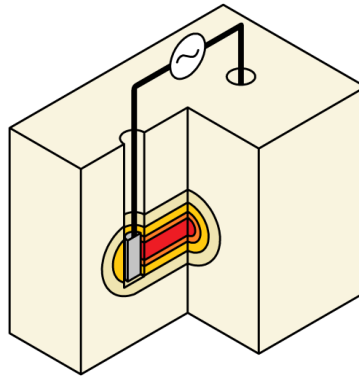


Рисунок 5.12 – Схема нагрева подземного пласта

Протекание тока вызывает выделение джоулева тепла в угле:

$$Q(t) = \int_0^t U(t)I(t)dt = \int_0^t \frac{U^2(t)}{R(t)} dt, \quad (5.3)$$

где Q – тепловая энергия, I – ток, U – напряжение на электродах, R – сопротивление межэлектродного участка, t – время воздействия.

Однако удельное электрическое сопротивление угля бывает весьма велико – 10^{10} - 10^{12} Ом·см [126-130]. Таким образом, чтобы обеспечить выделение необходимой для нагрева мощности потребуется весьма высокое напряжение. Однако уменьшение межэлектродного сопротивления можно добиться путем создания канала пробоя. Канал пробоя сформирован из вещества угля, модифицированного плазмой электрических разрядов. В результате пиролиза под действием высокой температуры плазмы сопротивление угля снижается. Известно, что в температурном диапазоне 350-500°C без доступа воздуха происходит карбонизация угольного вещества, в результате чего его электрическое сопротивление снижается до 10 - 10^2 Ом·см [129]. Благодаря этому канал имеет достаточно низкое сопротивление для пропускания тока при технически целесообразной величине напряжения.

Для оценки эффективности способа необходимо рассчитать требуемую величину напряжения и мощности наземного электрооборудования, а также потенциальную скорость нагрева.

В разделе описано математическое моделирование с целью определения динамики температуры в окрестности канала, а также расчета требуемых технических характеристик наземного источника электроэнергии.

Термохимическое преобразование угля без доступа внешних реагентов

При нагреве угля органическая масса претерпевает изменения, происходящие под действием температуры. В диапазоне от исходной температуры до 120°C происходит выход влаги, которая содержится в угле как в свободном, так и в ионно-связанном виде. При дальнейшем нагреве от 120°C до 300°C выходит преимущественно ионно-связанная и пирогенетическая влага. Далее в диапазоне от 300°C до 550°C происходит разложение твердых органических соединений с образованием жидких и газообразных углеводородов. Остатком от реакций распада является кокс – аморфный углерод. За счет появления кокса снижается электрическое сопротивление угля. При температурах выше 550°C происходят вторичные реакции жидких и газообразных углеводородов с твердым углеродом. Продуктами этих реакций являются газообразный водород и монооксид углерода.

Предположим, что с поверхности земли до подземного угольного пласта пробурены две скважины, расположенные на расстоянии d друг от друга. В скважинах расположены электроды, подключенные кабелями к наземному источнику электрической энергии. Между электродами сформирован канал электротеплового пробоя, и по каналу протекает ток. Канал будет выполнять функцию электрического нагревательного элемента, нагревая подземный пласт. Рассмотрим процесс нагрева.

Выделяемая в пласте мощность электрического нагрева будет расходоваться на нагрев окрестного пространства и термохимические превращения. Кроме того, часть тепловой энергии будет рассеиваться в окружающее пространство. Таким образом, тепловой баланс нагрева выглядит следующим образом:

$$Q_r = Q_h + Q_{ch} + Q_s \quad (5.4)$$

где Q_r – источник тепла, Q_h – энергия, расходуемая на нагрев породы, Q_{ch} – энергия, расходуемая на термохимические превращения, Q_s – энергия, рассеиваемая в окружающее пространство за счет теплопроводности.

Источник тепла

Источником тепла является канал электротеплового пробоя. Нагрев начинается с момента, когда электроразрядные структуры, развивающиеся в угле, замыкают межэлектродное расстояние [131]. В момент формирования сквозного проводящего канала, его диаметр весьма мал по сравнению с межэлектродным расстоянием и составляет не более 0,1 мм [132,133]. В этот момент начинается нагрев. Если упрощенно представить, что канал расположен вдоль прямой, соединяющей два электрода, то источник нагрева представляет собой цилиндр, имеющий электрическое сопротивление:

$$R = \frac{1}{\sigma} \frac{d}{S} = \frac{4d}{\sigma \pi D^2} \quad (5.5)$$

где R – электрическое сопротивление канала, d – длина канала, σ – электропроводность карбонизированного угля, D – диаметр канала. Канал состоит из угольного вещества, подверженного пиролизу. Удельное сопротивление этого вещества составляет для рассматриваемых углей ~ 100 Ом·см. По мере нагрева области вокруг канала, уголь в ней также подвергается пиролизу. Его сопротивление также снижается, т.е. происходит расширение канала (рисунок 5.12).

Мощность, выделяемую при нагреве, математически можно описать выражением:

$$W_r = \sigma E^2 \quad (5.6)$$

$$E^2 = E_x^2 + E_y^2 + E_z^2 \quad (5.7)$$

где E – модуль вектора напряженности электрического поля, E_x , E_y , E_z – его проекции в трех измерениях, σ – электропроводность угля.

Поглощение тепла

Как видно из уравнения теплового баланса (6.1), расходование тепла происходит на нагрев угольного вещества, а также на термохимические превращения. Компонент, отвечающий за теплоту термохимических превращений, может быть как положительным, так и отрицательным в зависимости от баланса экзотермических и эндотермических реакций. Это видно по кривой теплового потока термогравиметрического анализа. В разных диапазонах температур тепловой поток пиролиза может быть положительным или отрицательным. В среднем, однако же, доминируют эндотермические реакции, таким образом, часть тепла поглощается. Физическая теплоемкость угля без учета термохимических реакций также зависит от температуры. Определить температурную зависимость теплоемкости угля без учета энергии термохимических превращений не представляется возможным. Поэтому чаще используют эффективную теплоемкость, т.е. теплоемкость с учетом поглощения энергии на термохимические превращения. В расчетах использована эффективная теплоемкость, аналитическая форма которой аппроксимирована в температурном диапазоне по полиномиальной функции.

Рассеяние тепла

Изначально подземный пласт имеет некоторую исходную температуру. Если мы нагреваем участок пласта, часть тепловой энергии будет распространяться в менее нагретые окружающие области за счет теплопроводности и массопереноса. Поскольку уголь не прозрачен в инфракрасном диапазоне, теплопередача за счет излучения отсутствует.

Предположительно, основной теплоотвод будет происходить за счет теплопроводности, поэтому массоперенос в модели не учтен.

Эволюция поля температур следует из решения трехмерной задачи теплопроводности, включающей уравнение теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + W(E) \quad (5.8)$$

где T - температура, t - время, x, y, z - пространственные координаты; c - теплоемкость, ρ - плотность, λ - коэффициент теплопроводности; $W(E)$ - источник тепла. В качестве меры изменения электрофизических и теплофизических характеристик угля, происходящих по мере нагрева, использовался коэффициент η , называемый степенью превращения и изменяющийся по мере нагрева от 0 до 1. Нулевому значению коэффициента превращения соответствует наименьшая электропроводность нагреваемого угля. Значение 1 означает, что в данной области уголь полностью подвергся пиролизу и имеет наибольшую электропроводность.

Условия нагрева

Начальные условия нагрева заданы следующим образом: $t = 0$: $T_0 = 0$, $\eta = 0$.

С учетом экспериментальных и литературных данных для углей Казахстана были приняты следующие усредненные значения параметров:

$\rho = 1900 \text{ кг/м}^3$, значения теплопроводности и теплоемкости заданы аналитически в виде степенной аппроксимации от температуры:

$$\lambda = k_0 + k_1 T + k_2 T^2 + k_3 T^3 + k_4 T^4 + k_5 T^5 \quad (5.9)$$

$$c = k_0 + k_1 T + k_2 T^2 + k_3 T^3 \quad (5.10)$$

Значения коэффициентов приведены в следующей таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Значения коэффициентов теплоемкости и теплопроводности

Показатели	k_0	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
c	$1,379 \cdot 10^3$	-11,763	0,145	$-3,964 \cdot 10^{-4}$	—	—
λ	1,566	-0,064	$1,215 \cdot 10^{-3}$	$-1,062 \cdot 10^{-5}$	$4,39 \cdot 10^{-8}$	$-6,927 \cdot 10^{-11}$

Зависимость удельного сопротивления от температуры аппроксимирована функцией:

$$\rho = k_0 \exp(k_1 T) \quad (5.11)$$

где $k_0 = 1,73968 \cdot 10^{11}$, $k_1 = -0,04647$

Решение задачи осуществлялось с использованием неявной схемы расщепления и покоординатной прогонки.

5.4 Расчетные исследования нагрева подземного пласта

Расчеты нагрева угля в пласте проводились для межэлектродного расстояния 0,5 м. На рисунке 5.13 приведена зависимость температуры в центре межэлектродного расстояния от времени нагрева. При этом использовался режим постоянной мощности нагрева.

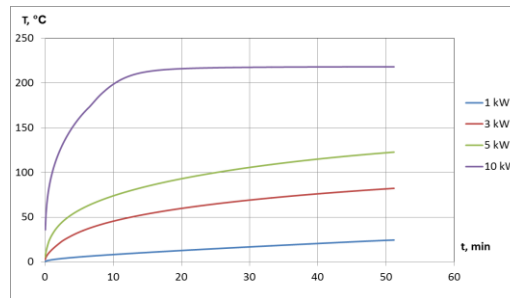
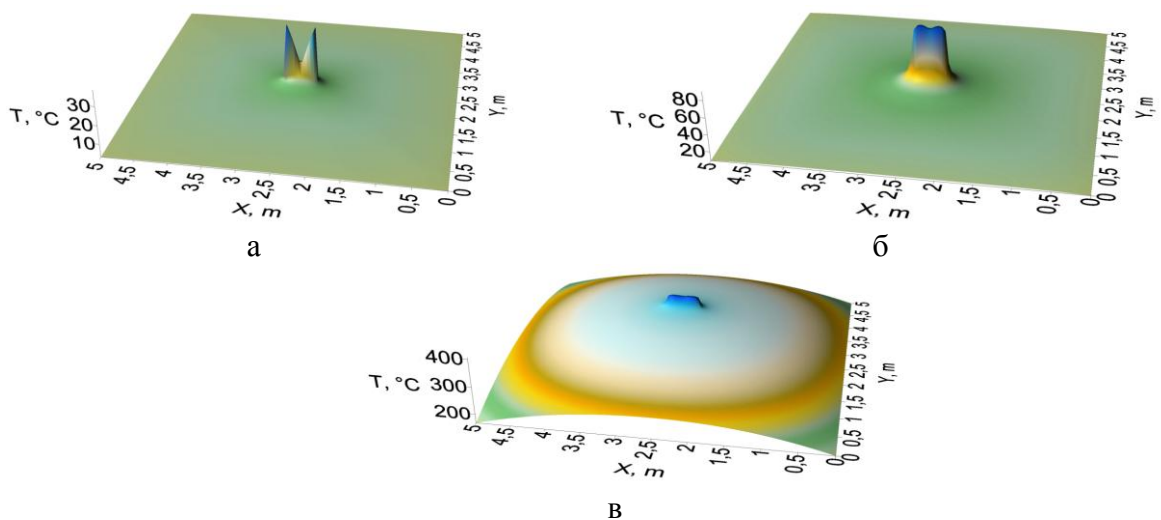


Рисунок 5.13 – Температура в центре межэлектродного расстояния при разной величине выделяемой мощности

Вначале нагрев происходит интенсивно, затем, когда температура вблизи электродов становится высокой, нагрев замедляется за счет оттока тепла в окрестное пространство.

Кроме температуры в межэлектродном пространстве, на эффективность технологии влияет также распределение тепловой энергии в окрестности электродов. На рисунке 5.14 показаны изображения теплового поля в расчетной области в разные моменты времени при мощности нагрева 3 кВт.



а - 5 минут, б - 30 минут, в - 10 часов

Рисунок 5.14 – Тепловое поле в расчетной плоскости в моменты времени

Наиболее характерными являются следующие особенности. В начале нагрева температура резко возрастает в непосредственной близости с электродами. Далее происходит прогрев межэлектродного пространства, при этом окружающие области нагреваются слабо. Спустя более продолжительное время тепловая энергия начинает распределяться по направлению от электродов, прогревая таким образом область в радиусе нескольких метров.

Подготовка натуральных испытаний технологии требует знания требуемых технических параметров оборудования для нагрева. По известным величинам начального и конечного (до и после пиролиза) сопротивлений угля, а также рассчитав степень превращения, можем определить изменение межэлектродного сопротивления по мере нагрева. Результаты для межэлектродного расстояния 0,5 м приведены на рисунке 5.15а. По известной величине сопротивления можем определить требуемые значения напряжения и тока. Результаты расчета для режима фиксированной мощности 3 кВт показаны на рисунке 5.15б и в.

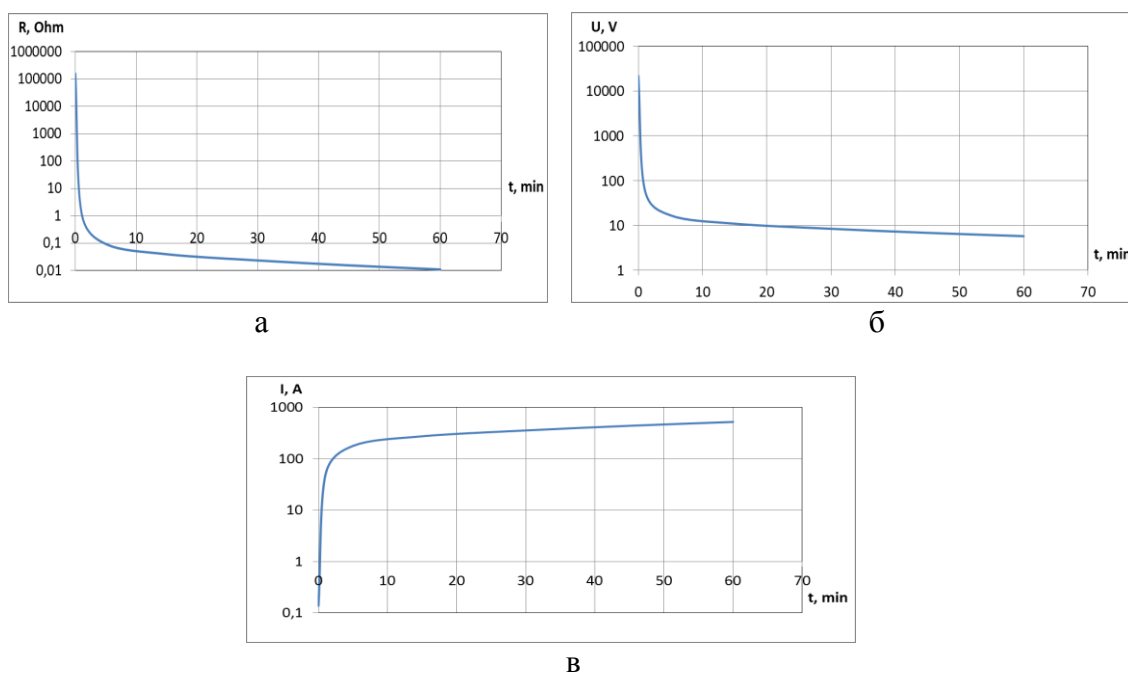


Рисунок 5.15 – Сопротивление межэлектродного участка (а) напряжение на электродах (б) и ток через канал (в) при нагреве постоянной мощностью 3 кВт межэлектродного участка 0,5 м

Таким образом, полученные результаты могут служить ориентиром для выбора оборудования для проведения натуральных испытаний. Согласно расчетам, для иницирования нагрева потребуется напряжение ~ 22 кВ. Далее по мере нагрева сопротивление будет уменьшаться. В соответствии с уменьшением сопротивления необходимо уменьшать напряжение и увеличивать ток, чтобы поддерживать вводимую мощность на постоянном

уровне. В течение часа сопротивление снижается до величины менее 1 Ом, таким образом, чтобы поддерживать заданную величину мощности, необходимо обеспечить ток около 500 А.

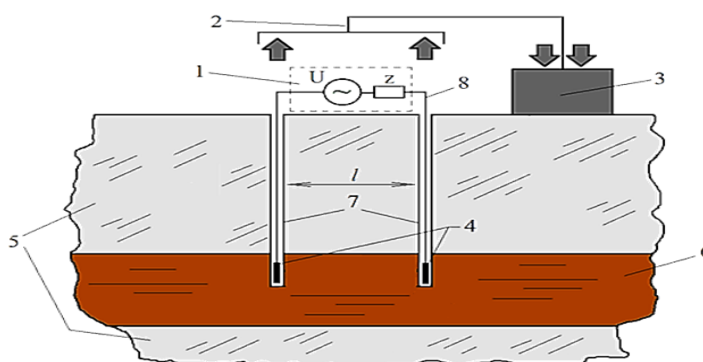
Следует учесть, что рассматриваемая модель имеет ряд ограничений. В модели не учтены следующие факторы, имеющие место при нагреве реального подземного пласта:

- изменение теплопроводности за счет растрескивания;
- массоперенос;
- диэлектрические и теплофизические свойства угля приняты изотропными, хотя из-за слоистой структуры, скорее всего, имеется анизотропия теплопроводности и электропроводности.

Однако, поскольку целью моделирования является оценка в первом приближении параметров процесса, мы считаем, что эти ограничения оправданы.

5.5 Испытания подземного нагрева углей на участке пласта

Проведение натурных испытаний состоит в том, чтобы нагревать подземный угольный пласт электрическим током и получать пиролизный газ (рисунок 5.16). Далее очищенный газ может быть использован для получения тепловой, электрической энергии или синтеза жидких углеводородов.



1 – наземное электрооборудование; 2, 3 – система отбора газа; 4 – электроды; 5 – смежные породы; 6 – пласт твердого топлива; 7 – скважины; 8 – соединительные провода

Рисунок 5.16 – Схема размещения электродов

Установка

Электрическая установка для нагрева участка подземного пласта включает три ступени, генерирующие напряжения разного диапазона (рисунок 5.17). Высоковольтное звено позволяет регулировать выходное напряжение от 10 кВ до 100 кВ с максимальным выходным током 2 А. Промежуточное звено имеет диапазон выходных напряжений от 250 В до 10 кВ при выходном

токе до 5 А. Сильноточное звено позволяет регулировать напряжение на выходе от 20 В до 250 В при токе до 250 А.

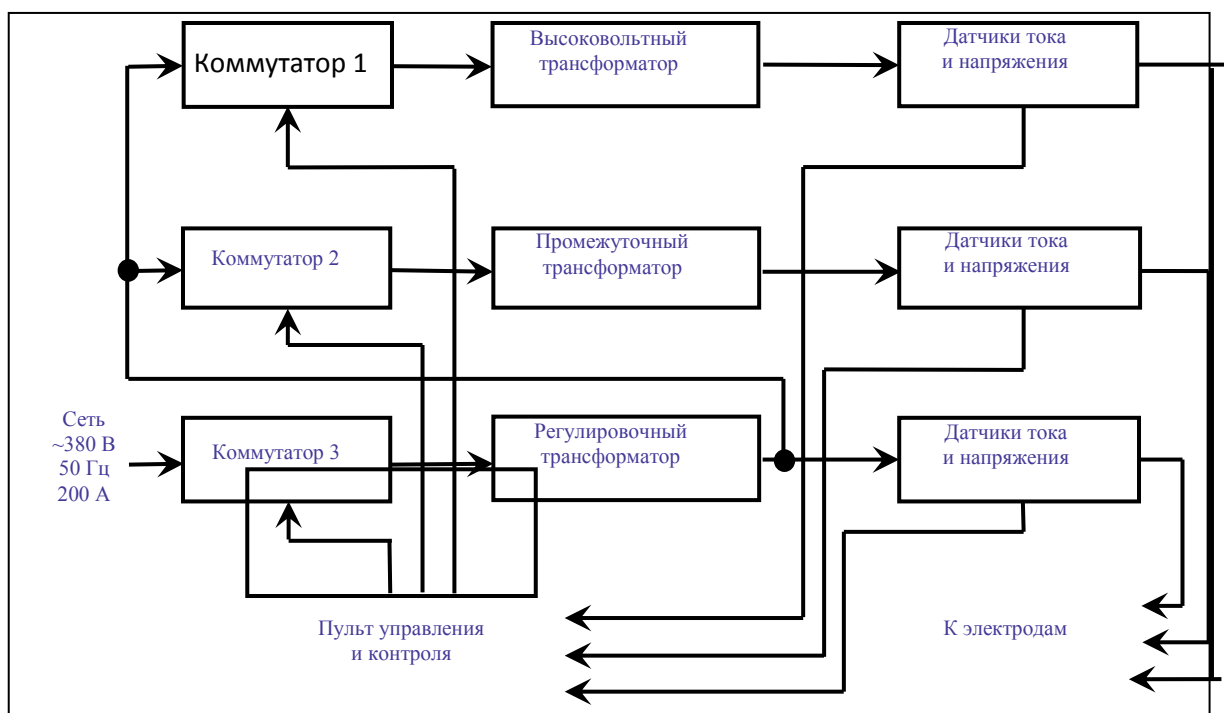


Рисунок 5.17 – Структурная схема установки

Для питания установки требуется трехфазная сеть переменного напряжения 380 В с допустимым током каждой фазы не менее 300 А. Питание на установку поступает через Коммутатор 3. При включении коммутатора напряжение сети поступает на сильноточный регулировочный трансформатор типа РОТМ-250/0,5. Это устройство обеспечивает плавную регулировку выходного напряжения от 20 до 250 В. Регулировочный трансформатор может работать как самостоятельное звено, обеспечивая большую величину тока, поступающего на электроды на этапе нагрева. На этапе работы высоковольтного или промежуточного звена, регулировочный трансформатор позволяет изменять напряжение питания этих звеньев. Это позволит плавно регулировать величину выходного напряжения в любом режиме работы установки. На вход высоковольтного трансформатора и трансформатора промежуточного звена питание поступает через коммутаторы 1 и 2 соответственно, что позволяет отключать не используемые в настоящий момент устройства. Коммутаторы 1, 2 и 3 управляются соответствующими органами, расположенными на лицевой панели пульта управления и контроля. Помимо органов управления, на лицевой панели пульта находятся индикаторы, отображающие напряжение и ток каждого из трех звеньев. Информация на индикаторы поступает с датчиков, расположенных на выходе каждого из силовых блоков. Напряжение с выхода силовых блоков поступает через датчики на электроды через коммутационный блок.

В качестве трансформатора промежуточного звена использован трансформатор ОМ-25/10. В качестве высоковольтного трансформатора использован трансформатор ИОМ-100/100.

В качестве коммутаторов использованы контакторы КТИ-7630, имеющие номинальный ток 630 А и напряжение 380 В. Все контакторы смонтированы в металлическом шкафу, имеющем двусторонний доступ (рисунок 5.18). На входе шкафа установлен автоматический выключатель ВА88-40, имеющий номинальный ток 630 А. Подача питания производится через рубильник ЯБПВУ-250. Шкаф имеет медные шины для подключения всех силовых агрегатов. В верхней трети шкафа установлена шина нейтрали, которая изолирована от корпуса шкафа. В нижней части шкафа установлена шина защитного заземления, имеющая электрическое соединение с корпусом шкафа. Шкаф также имеет:

- кросс-модуль на четыре полюса для подключения трех фаз и нейтрали;
- два слаботочных контактора КМИ-11810 для управления трехфазным двигателем регулятора РОТМ-250/0,5;
- набор клеммных колодок для подключения пульта управления к оперативным цепям контакторов и измерительным приборам;
- два измерительных трансформатора тока, измеряющих ток на входе и выходе регулятора РОТМ-250/0,5;
- трехфазный счетчик электроэнергии.

Подключение силовых цепей производится проводом ПВЗ 1х120, имеющем сечение 120 мм², через уплотнительные вводы РГ-29.

Подключение пульта управления к шкафу осуществлялось жгутом из 23 проводов ПВЗ 1х1, проложенным в металлорукаве с ПВХ-оболочкой.

Пульт управления установкой смонтирован на базе пластикового корпуса ЩМПп 400х300х220 (рисунок 5.19). Пульт имеет следующие органы управления и измерительные приборы:

- четыре двухпозиционных переключателя режимов работы установки;
- четыре сигнальных лампы включенного режима;
- две кнопки управления двигателем перемещения каретки регулятора РОТМ-250/0,5;
- две сигнальные лампы перемещения каретки регулятора;
- четыре вольтметра;
- четыре амперметра.



а



б

Рисунок 5.18 – Коммутационный шкаф в неподключенном (а) и подключенном (б) состоянии



а



б

Рисунок 5.19 – Пульт управления установкой в смонтированном (а) и работающем (б) состоянии

Вольтметры пульта показывают напряжение каждой из трех фаз трехфазной сети питания, а также напряжение на выходе регулятора. Амперметры показывают ток на входе регулятора и на выходе каждого из силовых узлов.

Внутри пульта управления установлен автоматический выключатель, подающий напряжение для питания оперативных цепей контакторов коммутационного шкафа.

5.6 Методика подготовки площадки и проведения исследований

Планировка испытательной площадки

Испытания проводились на угольном разрезе «Богатырь». Испытательная площадка находилась на открытой поверхности угольного пласта на горизонте -280 м, на самом глубоком

участке карьера. Испытательная площадка располагалась на ровном горизонтальном участке угольного пласта размерами $\sim 40 \times 20$ метров.

Для проведения испытаний на площадке были выделены три участка размерами 4×5 м. Каждый из участков представляет собой фрагмент угольного пласта, на котором предполагается проведение нагрева угля (рисунок 5.20).

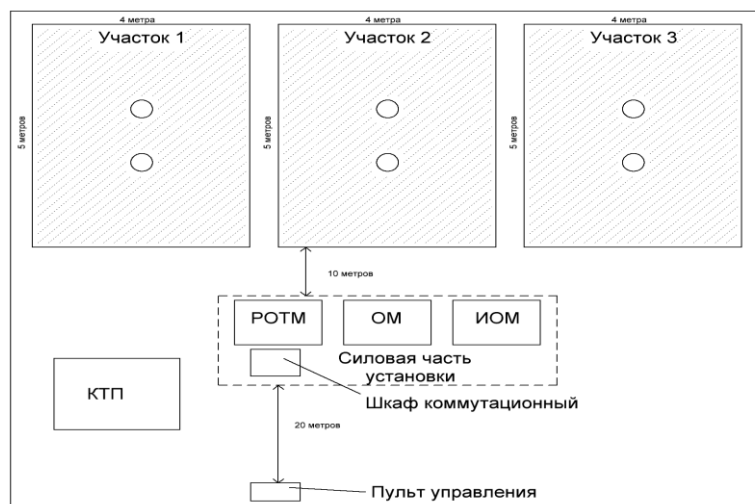


Рисунок 5.20 – Планировка испытательной площадки

Поскольку при проведении экспериментов предполагался непосредственный электрический контакт высокого напряжения с грунтом, необходимо соблюдать повышенные меры электробезопасности. Силовая часть установки была расположена на расстоянии ~ 10 метров от участков нагрева, что превышает межэлектродное расстояние в ~ 10 раз. Зона между силовой частью установки и нагреваемыми участками, а также некоторые ее окрестности, огораживались на время проведения эксперимента для исключения попадания людей в зону, где может возникнуть шаговое напряжение.

Вблизи установки была расположена комплектная трансформаторная подстанция от которой установка получала питание. Подстанция понижает напряжение 6 кВ локальной линии электропередач до 380 В, требуемых для питания установки. Пульт управления выносился на 20 метров от силовой части установки в сторону, противоположную нагреваемым участкам.

Обустройство нагреваемых участков заключалось в следующем. Вокруг участка размером 4×5 метров была построена опалубка под заливку бетона высотой 15 см. Бетонная заливка должна имитировать кровельные породы залегающего угольного пласта и препятствовать выходу газа на поверхность. В центре каждого участка были пробурены две скважины глубиной 0,5-1,5 метра, расположенные на расстоянии 1-1,5 метра друг от друга (рисунок 5.21).

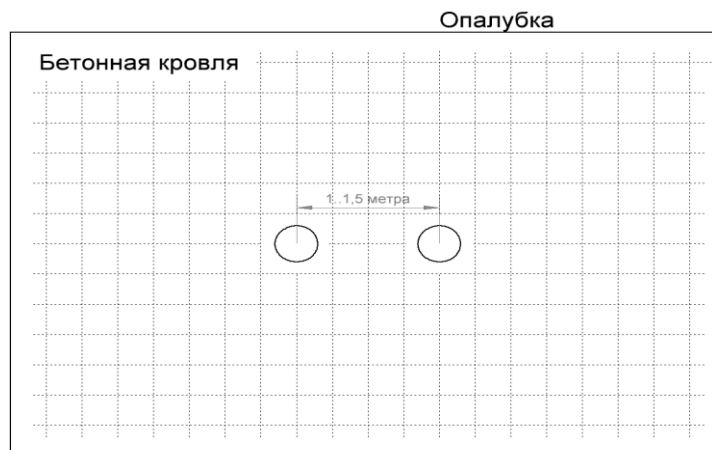


Рисунок 5.21 – Планировка нагреваемого участка

На месте скважин на поверхность устанавливались превенторы из нержавеющей стали. Превенторы представляют собой участок трубы из нержавеющей стали, имеющий с одной стороны фланец для крепления изолятора, а с другой стороны таких же размеров и формы посадочный диск. Превенторы имеют штуцер для выхода газа, имеющие резьбу на $\frac{1}{2}$ для посадки сантехнических вентилях (рисунок 5.22).

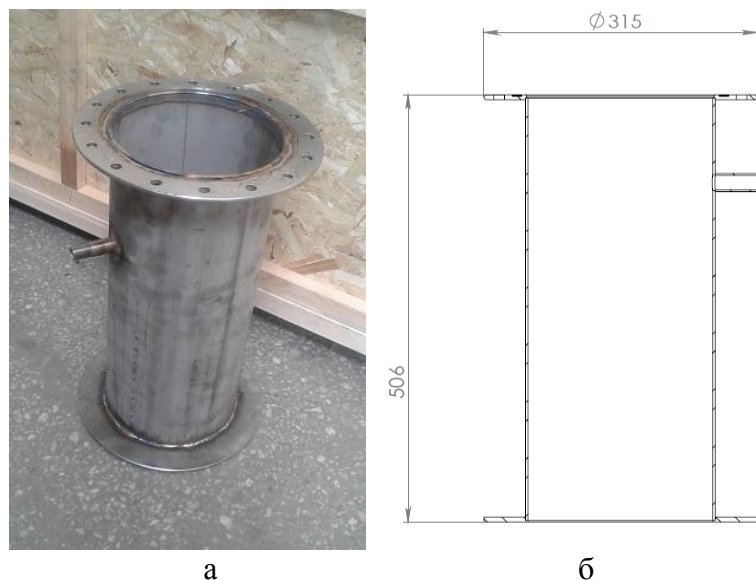


Рисунок 5.22 – Внешний вид (а) и эскиз (б) превентора

Превенторы предназначены для герметизации вводных изоляторов и бетонной кровли, и препятствуют свободному выходу пиролизного газа в атмосферу (рисунок 5.23).

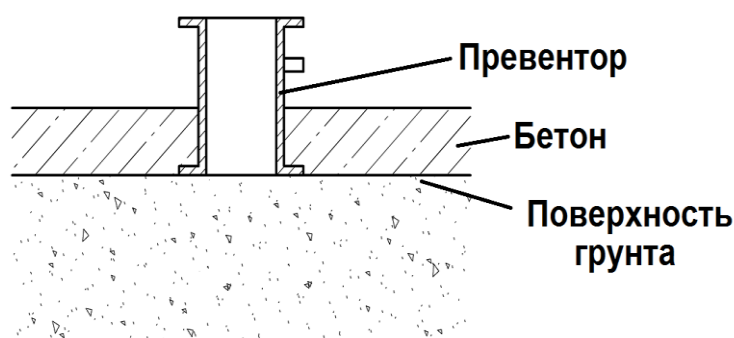


Рисунок 5.23 – Схема установки превентора

При проведении эксперимента на превентор устанавливается проходной изолятор (рисунок 5.24), который выполняет функцию электрической изоляции токопровода от превентора, при этом обеспечивая герметичное уплотнение с превентором. Изолятор изготовлен из полиэтилена, имеет оребренную поверхность. Высота изолятора от фланца составляет 380 мм в каждую сторону. Наружный диаметр ребер составляет 120 мм, внутренний диаметр – 56 мм. Внутри изолятора имеется отверстие диаметром 26 мм, в которое вставлен латунный токопровод. Фланец изолятора соединяется с фланцем превентора через уплотнительную прокладку, и крепится с помощью 16 болтов М12.

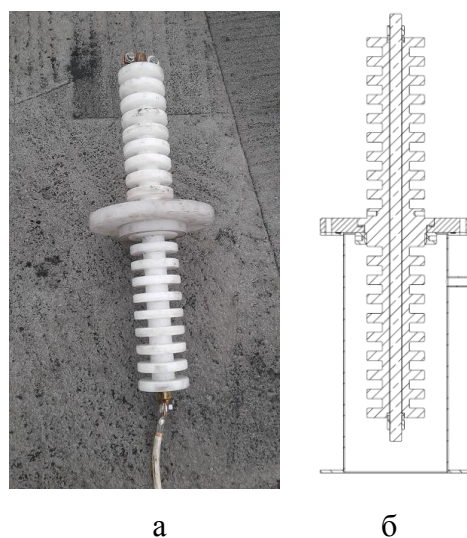


Рисунок 5.24 – Внешний вид изолятора (а) и эскиз изолятора в сборе с превентором (б)

Электрический контакт токопровода изолятора с внешними проводниками осуществляется с помощью медных скоб, закрепляемых болтовым соединением.

После того, как подготовлена опалубка и установлены превенторы, необходимо изготовить армирующий каркас для заливки бетона. Армирующий каркас представлял собой однослойную сетку с размером ячейки 150 мм, выполненную из стеклопластиковой арматуры диаметром 6 мм (рисунок 5.25). Армирующий каркас препятствует растрескиванию бетона,

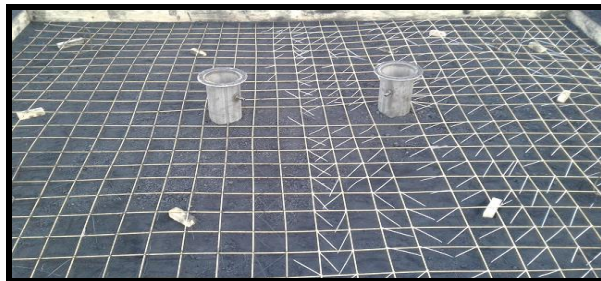
благодаря чему бетонная стяжка должна сохранять газоплотность. Благодаря использованию стеклопластиковой арматуры вместо стальной, плита имеет существенно меньшую электропроводность и обеспечивает большую степень электробезопасности. Бетонная стяжка высотой 100 мм заливалась из бетона марки М200.



а



б



в



г

а) установлена опалубка и пробурены скважины, б) установлены превенторы,
в) уложена сетка из арматуры, г) залита бетонная стяжка

Рисунок 5.25 – Подготовка нагреваемого участка

После затвердевания бетона были установлены проходные изоляторы и смонтирована газовая система (рисунок 5.26). К штуцерам превенторов были прикручены вентили, на которые устанавливались шланги для отвода пиролизного газа.



Рисунок 5.26 – Внешний вид испытываемого участка

С внешней стороны проходные изоляторы подключались к выводам электроустановки. С внутренней стороны изоляторы фрагментом кабеля подключались к электродам. Электроды были изготовлены из участка стальной трубы ДУ 50 длиной ~150 мм (рисунок 5.27). Электроды закреплялись к наконечнику провода болтовым соединением.



Рисунок 5.27 – Электрод

Отрезок провода для крепления электрода изготавливался с запасом в ~100 мм, для прижима электрода к дну скважины за счет пружинящего эффекта провода.

5.7 Электротепловой нагрев угольного пласта разреза «Богатырь»

На одном из подготовленных к испытаниям участков был произведен нагрев. Глубина скважин на участке составила 0,65 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

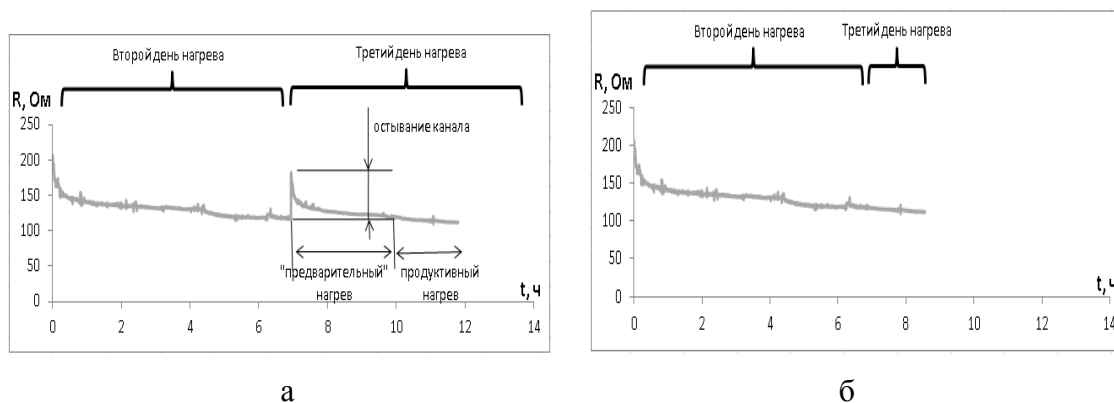
электроды напряжения в диапазоне 250..10000 В. Питание трансформатора производилось от регулятора РОТМ-250/0,5.

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 килоом 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.

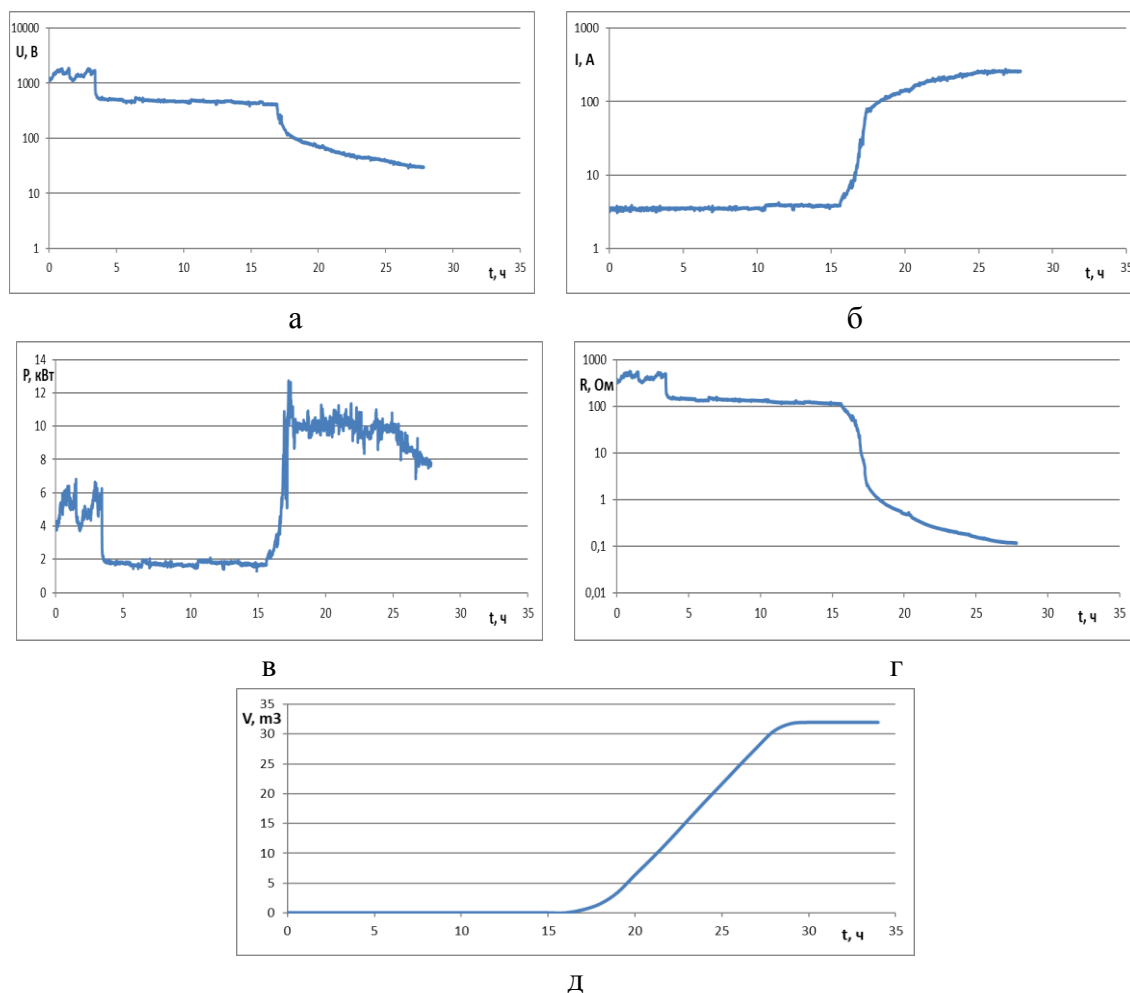
Нагрев производился в течение рабочего дня, на ночь нагрев останавливался. Такой график работы был выбран по причине того, что на разрезе отсутствовали условия для круглосуточной работы. Однако в течение нагрева замечена четкая зависимость динамики сопротивления межэлектродного участка от времени нагрева. 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 5.28).

Полученные в результате графики с некоторой долей допущения демонстрируют поведение электрических параметров для ситуации, как если бы нагрев производился непрерывно (рисунок 5.29). 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.



а) исходный график; б) «сшитый» график (без учета «предварительного» нагрева)

Рисунок 5.28 – Демонстрация способа «сшивки» графиков на примере графика сопротивления межэлектродного участка от времени



напряжение (а), ток (б), мощность (в) и сопротивление (г), выход газа (д)

Рисунок 5.29 – Непрерывные диаграммы электрических параметров и выхода газа во времени

Были проведены поэтапные 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 джоулева 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 5.29 д). Выход газа в единицу времени на этом участке составлял около 3 м³/час. Состав полученного газа и анализ физико-химических характеристик карбонизованного угля Богатырь с испытательного участка приведены в таблицах 5.4 и 5.5.

Таблица 5.4 – Состав горючего газа месторождения Богатырь

Компонент объёмн, %	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 5.5 – Физико-химические показатели карбонизованного образца угля Богатырь после электронагрева

Определяемый показатель	Фактически полученные результаты
1	2
Массовая доля аналитической влаги, W ^a , %	1,4
Зольность, A, %	47,7

Продолжение таблицы 5.5

1	2
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_s^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



Рисунок 5.30 – Газовый счетчик G4, использованный в эксперименте

Средняя мощность нагрева на этом этапе составила 9,96 кВт, количество затраченной электроэнергии 86,55 кВт·ч.

Через 25 часов от начала нагрева сопротивление межэлектродного канала снизилось до 0,15 Ом. Поддержание мощности в 10 кВт при таком сопротивлении требует тока в 250 А. При дальнейшем нагреве сопротивление канала продолжило плавно снижаться. Ток нагрузки при этом удерживался на уровне 250 А, поскольку эта величина тока являлась максимальной для входного распределительного ящика установки. При этом снижение сопротивления канала

начало приводить к снижению мощности. По этой причине на следующем этапе нагрева (25-28 часов от начала нагрева) мощность плавно снижалась с 10 до 7,5 кВт. Снижение мощности начало приводить к плавному снижению объема выделившегося газа в единицу времени, в связи с чем через 28 часов после начала нагрева эксперимент был завершен. На этом этапе (25-28 часов от начала нагрева) средняя мощность составляла 8,46 кВт, затраты электроэнергии составили 22,25 кВт·ч.

После отключения нагрева газ продолжает выделяться еще около 2,5 часов с постепенно спадающей динамикой. Всего за время эксперимента объем выделившегося газа, согласно счетчику, составил 38 м³ по показанию счетчика рисунок 5.30. Также следует учесть, что смола в текущем эксперименте не учитывалась в качестве продукта технологии и не отбиралась, однако фактически количество выходящей с газом угольной смолы весьма велико, рисунок 5.31.



а



б

Рисунок 5.31 – Выход газа а) из шланга, б) горение газа

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

регуливки выходного напряжения делает его применение незаменимым в данной исследовательской установке. При проектировании промышленных установок могут быть использованы трансформаторы без регуливки, имеющие более высокий КПД.

Газовая система установки была построена следующим образом. Превенторы имеют патрубки, к которым были подключены резиновые шланги. Шланги через тройник объединялись, после чего общий шланг поступал на накопительный фильтр, изготовленный из полиэтиленового бака объемом 60 литров (рисунок 5.32). Выход фильтра соединялся шлангом с газовым счетчиком, после которого газ сбрасывался в атмосферу.



Рисунок 5.32 – Фильтр газа

Изначально бак был пустой. Входной и выходной шланги подключались через стальные штуцеры. Ко входному штуцеру изнутри был присоединен шланг, идущий до дна бака. Назначение фильтра состояло в том, чтобы задерживать часть пара пирогенетической воды и смолы, а также взвеси твердых частиц. При нагреве вместе с газом происходило выделение большого количества смолы в виде аэрозольной фазы. Основная часть этой смолы не была задержана фильтром и оседала на стенках шлангов и счетчика. Предположительно, большая часть этой смолы в виде аэрозольной фазы была сброшена в атмосферу вместе с газом. Около 5 л смолы осело на стенках шлангов, внутри фильтра и счетчика. Визуально полученная угольная смола напоминает вязкую нефть и имеет консистенцию вазелина, а при нагреве до 60-70°C разжижается (рисунок 5.33).



Рисунок 5.33— Смола, вытекающая из сбросного штуцера

Очевидно, что при конверсии данного угля смолу следует рассматривать как основной продукт конверсии наравне с газом, и вести ее отбор. Для осаждения смолы из аэрозольной фазы нужно 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.

В процессе нагрева температура превенторов поднималась до 95°C. На рисунке 5.34 показано инфракрасное изображение превенторов, зарегистрированное тепловизором Flir E50.

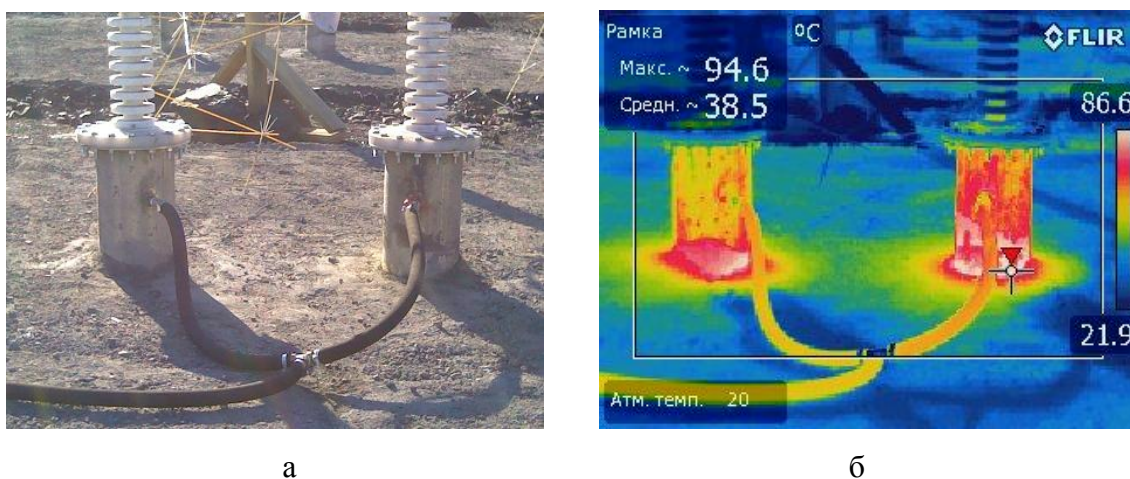


Рисунок 5.34 – Видимое (а) и инфракрасное (б) изображение превентора

Превенторы 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 (рисунок 5.35). 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.

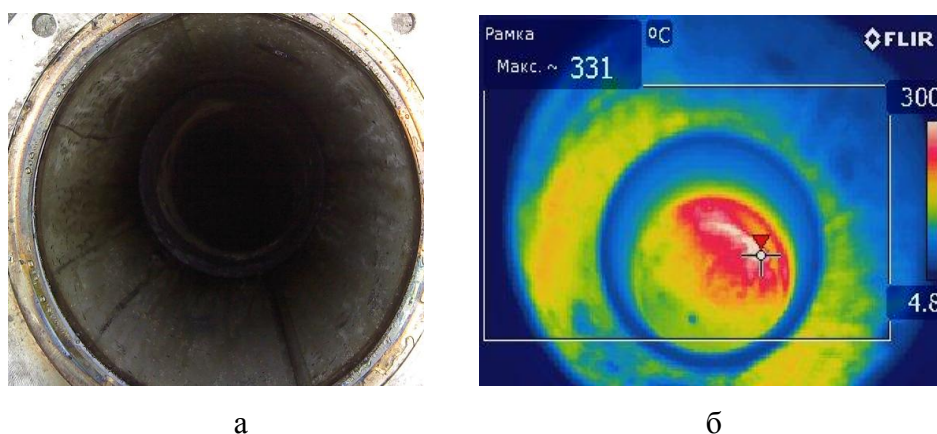


Рисунок 5.35 – Видимое (а) и инфракрасное (б) изображение забоя скважины

После вскрытия скважины было обнаружено, что один из проходных изоляторов оплавился изнутри. Температура плавления полиэтилена, из которого был изготовлен изолятор, составляет 135°C. Второй изолятор не изменил форму. Он был изготовлен из сверхвысокомолекулярного полиэтилена, температура плавления которого составляет 155°C. Таким образом, можно сделать вывод о том, что температура выходящего газа лежит в диапазоне 135-155°C.

После остывания нагретого участка было произведено вскрытие пласта с целью осмотреть прореагировавший объем угля. Часть бетонной плиты вблизи и между скважинами была измельчена и удалена, а уголь фрагментами откалывался и извлекался. На уровне забоя скважин был обнаружен визуально наблюдаемый канал пиролиза (рисунок 5.36).

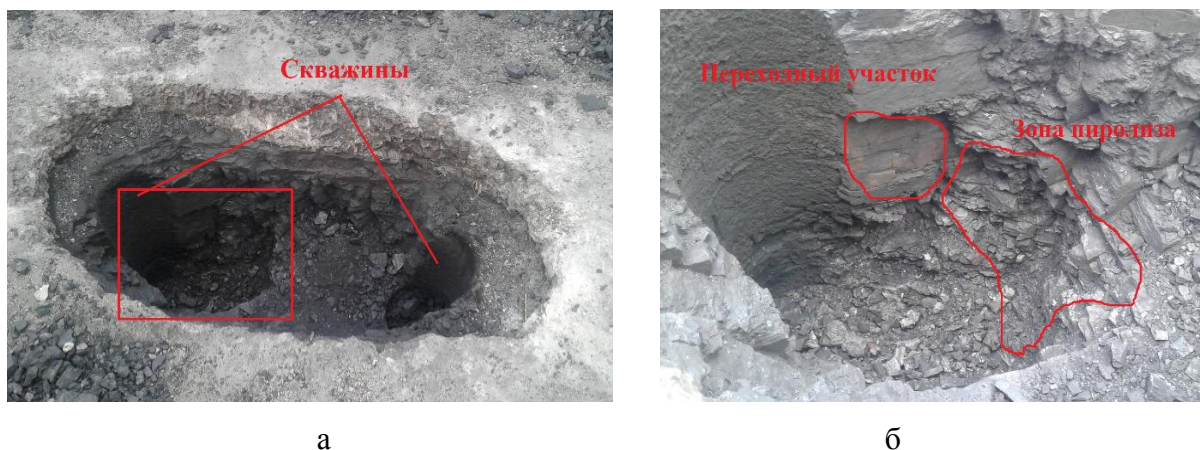


Рисунок 5.36 – Вскрытый пласт: общий вид (а) и увеличенный фрагмент (б)

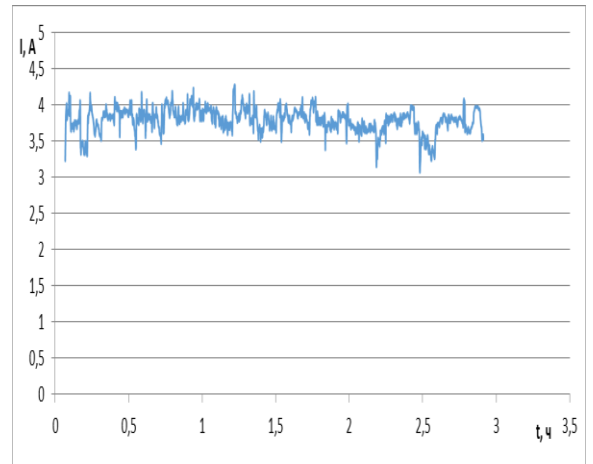
Канал прореагировавшего угля имел приблизительный диаметр 0,3 м. Часть угольного вещества, подвергшаяся пиролизу, имеет серый цвет и выражено пористое строение. Прочность этого вещества заметно не отличается от прочности исходного угля. Вокруг канала можно было рассмотреть переходный участок, вещество которого подверглось тепловому воздействию, но не было газифицировано полностью. Переходный участок имеет повышенную трещиноватость и желтоватый оттенок. Трещиноватость связана с испарением влаги из-за высокой температуры, а желтоватый оттенок, предположительно, связан с оседанием аэрозольных частиц смолы, дрейфовавшей из зоны пиролиза.

Подача напряжения между участками

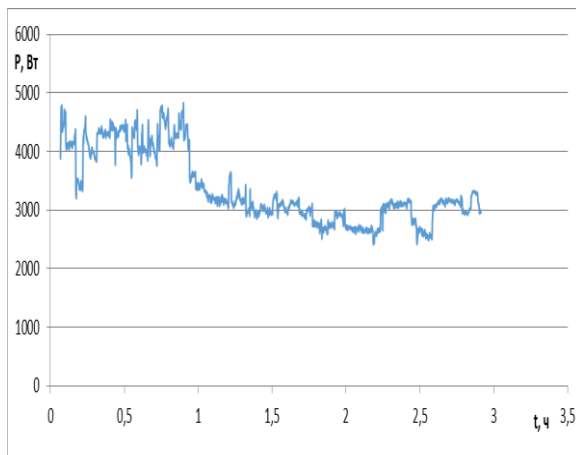
После завершения эксперимента на первом участке, был поставлен эксперимент по подаче напряжения между скважинами двух участков. Один электрод был установлен на одной из скважин первой площадки, а второй электрод – на одной из скважин второго участка. Цель эксперимента – оценить начальное сопротивление межэлектродного участка при большем расстоянии между электродами. В данном случае расстояние между скважинами составило 5,8 м. Напряжение подавалось от трансформатора промежуточного звена ОМ-25/10. Длительность эксперимента составила 3 часа, в течение которых наблюдалась динамика электрических параметров при величине подводимой мощности 3-4 кВт. Результаты показаны на рисунке 5.37.



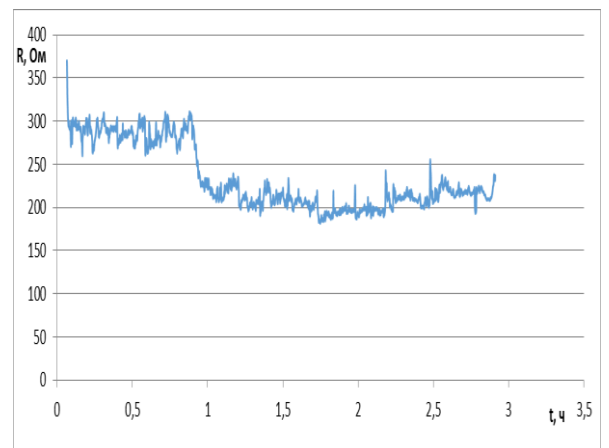
а



б



в



г

напряжение (а), ток (б), мощность (в) и сопротивление (г)

Рисунок 5.37–Диаграммы электрических параметров при подаче напряжения между участками

Было обнаружено, что начальное сопротивление межэлектродного участка составляет около 300 Ом, что близко к начальному сопротивлению первого участка. По мере нагрева сопротивление снижалось и к концу нагрева приблизилось к 200 Ом. Такая начальная величина сопротивления подтверждает предположение о том, что величина начального сопротивления слабо зависит от межэлектродного расстояния, поскольку увеличивается не только длина участка протекания тока, но и площадь сечения этого участка. Таким образом, при переходе на большее межэлектродное расстояние, начальное сопротивление канала не будет линейно возрастать.

Таким образом, из проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1) Установка и методика проведения экспериментов, в целом, показали свою работоспособность и пригодность для достижения цели исследований. Предположительно, напряжение установки достаточно для работы с межэлектродным расстоянием в 10-20 метров.

2) Бетонная плита как имитация кровельных пород, в целом, выполняет свою функцию, однако возможно возникновение течей через зазор между плитой и превентором. Для исключения этого фактора, щель целесообразно уплотнять битумной мастикой или другим способом. Возможно, при заливке бетона уголь поглощает часть влаги, что увеличивает влагонасыщение угля. Для исключения этого фактора необходимо укладывать между бетоном и углем слой водонепроницаемого материала, либо заменить бетонную стяжку другой газоплотной имитацией кровельных пород.

3) При межэлектродном расстоянии ~ 1 м, мощность в 2 кВт достаточна для постепенного уменьшения сопротивления межэлектродного участка. Для более быстрого снижения сопротивления канала, необходимо увеличить мощность трансформатора промежуточного звена. Для проведения экспериментов на межэлектродном расстоянии 10-20 метров, трансформатор ОМ-25/10 целесообразно заменить более мощным, например, трансформатором ТСЛ-100/10/0,4 или ТМГ-100/10/0,4.

4) КПД установки составляет $\sim 70-75\%$, что является приемлемым, учитывая опытный характер установки. Основные потери приходятся на регулятор РОТМ-250/0,5 и связаны с используемым физическим принципом регулирования напряжения. При промышленном применении технологии КПД может быть увеличен, например, за счет применения печных трансформаторов со ступенчатой регулировкой напряжения.

5) В фазе активного нагрева пласта, выходящий газ имеет высокую температуру, что приводит к плавлению полиэтиленового изолятора. Для исключения этого фактора целесообразно внести в методику следующие корректировки. На этапе приложения высокого напряжения, когда есть опасность пробоя на превентор, необходимо использовать высоковольтный проходной изолятор из полиэтилена. На этом этапе нагрева отсутствует активное газовыделение, и, как следствие, нет опасности оплавления изолятора. После снижения сопротивления пласта и перехода на низковольтное звено, высоковольтный изолятор должен быть заменен на низковольтный термостойкий изолятор, который может быть изготовлен из стеклотекстолита, фторопласта или керамики.

6) После отключения подачи электроэнергии происходит постепенное снижение газовыделения вплоть до полного прекращения. Это свидетельствует о том, что исследуемый уголь не склонен к экзотермическому тлению, что исключает вероятность возникновения подземных пожаров.

5.8 Технико-экономические расчетные показатели технологии

Впервые проведенные полевые и натурные испытания на угольном пласте разреза ТОО «Богатырь Комир» позволяют оценить экономическую эффективность работы. Произведена оценка технико-экономических показателей применения разрабатываемой опытно-промышленной установки по следующим показателям:

Технологический процесс

За основу расчета были взяты случай газификации угля, залегающего на глубине от 5 до 30 метров и накрытого естественной кровлей. Перед началом работ на задействованной территории должна быть пробурена сетка из скважин, которые попарно будут использоваться для нагрева и газификации. Для газификации создаются несколько участков, расположенных вблизи друг от друга. Каждый участок представляет собой территорию, на которой пробурены две скважины до угольного пласта. В расчетах предполагается, что среднее расстояние между скважинами одного участка составляет 5 метров. На дневной поверхности располагается оборудование для нагрева и рабочее место операторов установки. В расчетах предполагается, что в одновременной эксплуатации находятся несколько установок, работающих на смежных участках. По мере выработки задействованных участков, оборудование постепенно перемещается вдоль пласта.

Требования к производственной инфраструктуре

Для функционирования установки необходимо, чтобы она была подключена к питающей сети с напряжением 380 В.

Основным товарным продуктом технологии согласно описанному технологическому процессу является горючий газ. В данном расчете предполагается, что заранее предусмотрен канал утилизации газа. В качестве такого канала может быть использован временный трубопровод, ведущий на котельные агрегаты, позволяющие сжигать газ с целью получения тепловой энергии.

Основное оборудование, приспособления и оснастка

Стоимость основных узлов и комплектующих опытно-промышленной установки показаны в таблице 5.6. Приведенные в таблице цены определены на основании изучения текущих цен на рынках и на основе опыта покупок и заказа изготовления аналогичных изделий. Основное оборудование практически не теряет ресурс и стоимость за сеанс прогрева одного участка. Таким образом, при расчете себестоимости продукции амортизацией оборудования можно пренебречь и производить расчет по методу директ-костинга, то есть учитывая только переменные издержки.

Таблица 5.6 – Основные узлы и комплектующие установки

Наименование	Стоимость, тыс. руб.
Регулятор напряжения	2 592
Повышающий трансформатор 2 кВ	500,0
Повышающий трансформатор 15 кВ	500,0
Повышающий трансформатор 100 кВ	966,7
Коммутационные элементы	450,0
Корпусные изделия	183,30
Автоматика, измерение и управление	200,0
Соединительные проводники	280,0
Инструменты и вспомогательные приспособления	83,00
Итого	5 755,00

Таким образом, оценочная стоимость одной установки составляет 5 755 000 рублей.

Персонал и трудозатраты

Трудозатраты на реализацию технологии можно разделить на подготовительные работы и обслуживание установки в процессе нагрева.

Подготовительные работы заключаются в доставке оборудования на участок и устройство скважин. Первичный завоз оборудования на месторождение является наиболее затратным этапом. Дальнейшее перемещение установки между участками является гораздо менее затратным. Требуемый диаметр скважин составляет от 100 мм и более, а глубина зависит от толщины кровельных пород. Затраты на подготовку одного участка в среднем можно оценить в 83,33 тыс. рублей.

Трудозатраты на реализацию технологии заключаются в работе операторов установки. Эта работа состоит в мониторинге измеряемых параметров и поддержании требуемого режима работы установки. Во время работы установки, согласно правилам электробезопасности, на площадке должно находиться не менее двух сотрудников, имеющих четвертую квалификационную группу по электробезопасности. Однако с точки зрения оптимизации затрат целесообразно, чтобы одна группа операторов одновременно управляла несколькими установками. Ввиду небольшого объема работ по контролю и регулированию параметров оборудования, одна группа может одновременно контролировать до пяти установок. Учитывая квалификацию и характер работы операторов, можно оценить уровень оплаты труда каждого оператора в 200 руб/час с учетом налогов и обязательных платежей. Если два оператора

обслуживают одновременно пять установок, стоимость трудозатрат для каждой установки составляет $200 \cdot 2/5 = 80$ руб/час.

Энергозатраты

Одной из основных статей затрат на реализацию технологии является электрическая энергия, затрачиваемая на нагрев. Рассчитаем затраты на электроэнергию для нагрева одного участка.

При межэлектродном расстоянии 5 метров, согласно расчетным и экспериментальным исследованиям, прогреву до температуры пиролиза подвергнется не менее 5 м^3 угля. Согласно экспериментальным данным, для прогрева и газификации 1 м^3 угля необходимо вложить 550 кВт/ч электрической энергии. Таким образом, энергозатраты на прогрев 5 м^3 угля составляют $5 \cdot 550 = 2750$ кВт/ч. С учетом КПД установки, составляющего порядка 75% по данным предварительных испытаний, полные энергозатраты на прогрев должны составлять $2750/0,75 = 3670$ кВт/ч. При средней потребляемой мощности 20 кВт время обработки одного участка составит 184 часа.

Сводная себестоимость продукции

Согласно методу директ-костинга, себестоимость продукции определяем путем отношения переменных издержек на производство продукции к объему произведенной продукции. В качестве продукта технологии будем учитывать только газ, без учета возможных побочных продуктов (смола, пирогенетическая жидкость, карбонизированный твердый остаток), поскольку технологии их извлечения и использования еще не были опробованы.

Совокупные затраты на газификацию одного приведенного участка складываются из стоимости подготовительных работ, стоимости затраченной электроэнергии и трудозатрат операторов установки показаны в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Сводные издержки на газификацию одного участка

Статья затрат	Единицы измерения	Кол-во	Цена, руб/ед.	Сумма, руб
Электроэнергия	кВт/ч	3670	2,42	8 881
Подготовительные работ	шт.	1	14 167	14 167
Работа оператора установки	час	184	80	14 720
Итого:				37 768

Объем газа, получаемый при газификации 1 м^3 угля, согласно экспериментальным данным составляет в среднем 3000 м^3 при средней теплотворной способности газа 14 МДж/м^3

(3350 ккал/м³). Таким образом, с одного участка можно получить в среднем $5 \cdot 3\,000 = 15\,000$ м³ газа. Поделив сводные издержки одного участка на объем газа, получаем, что ожидаемая наивысшая себестоимость газа составляет $37\,768 / 15\,000 = 2,52$ руб/м³.

Следует учитывать, что при дальнейшем совершенствовании технологии будут улучшены следующие технико-экономические показатели:

- увеличен выход газа с 1 м³ угля;
- увеличен выход газа с одного участка;
- увеличена удельная теплота сгорания получаемого газа;
- уменьшена стоимость подготовительных работ;
- уменьшена стоимость трудозатрат на газификацию одного участка.

Кроме того, существует возможность использовать побочные продукты технологии, такие как угольная смола и пирогазетическая жидкость, твердый карбонизированный остаток.. Таким образом, имеется потенциал для снижения себестоимости газа в несколько раз.

Экономическая эффективность

Сравним стоимость тепловой энергии получаемого газа со стоимостью тепловой энергии метана. Себестоимость одного гигаджоуля тепловой энергии получаемого газа составляет:

$$p = 2,52 \text{ [руб/м}^3\text{]} / 1000 \text{ [МДж]} / 14 \text{ [МДж/м}^3\text{]} = 179,76 \text{ руб.}$$

Себестоимость одного гигаджоуля тепловой энергии, получаемой метана, при стоимости метана 7,67 руб/м³ и калорийности 36 МДж/м³ составляет:

$$p = 7,67 \text{ [руб /м}^3\text{]} / 1000 \text{ [МДж]} / 39 \text{ [МДж/м}^3\text{]} = 196,58 \text{ руб.}$$

Таким образом, стоимость тепловой энергии получаемого газа при текущих расчетных параметрах сравнима со стоимостью тепловой энергии метана, и даже немного ниже. При анализе полученного результата следует принять во внимание потенциал снижения себестоимости получаемого газа, а также не повсеместную распространенность природного метана.

Экологические воздействия

Реализация технологии сопряжена с рядом экологических рисков. Во-первых, необходимо следить за газоплотностью кровли пласта и газоотборных систем, чтобы исключить попадание пиролизного газа в атмосферу. Газ является горючим и токсичным для человека, поэтому представляет особую опасность для персонала.

Во-вторых, существует вероятность попадания угольной смолы в грунтовые воды. Для учета этого риска необходимо анализировать наличие над пластом грунтовых вод и направление их перемещения.

В-третьих, существует вероятность того, что после завершения работ на участке уголь будет продолжать тлеть за счет собственного кислорода. Чтобы избежать этого эффекта,

необходимо предварительно проанализировать, склонен ли уголь к экзотермическому пиролизу. Это можно установить, например, с помощью термогравиметрического анализа, проводимого в бескислородной атмосфере.

В-четвертых, существует риск некоторого опадания ландшафта из-за выработки части объема угольного вещества. Однако на этапе применения опытно-промышленной установки не идет речь о значительной выгазовке мощных пластов, поэтому влияние этого фактора маловероятно.

Перечисленные риски представляются преодолимыми, однако они все должны быть учтены при принятии решения о промышленном применении технологии.

Выводы по главе 5:

1. 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.

2. 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.

3. Из исследуемых углей путем электронагрева можно получать газ с теплотворной способностью от 12 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.

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 внутрислоистой 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) углей 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.

Определения

Газификация – термический процесс, при котором органическая часть топлива превращается в горючие газы в присутствии воздуха, водяного пара, технического кислорода и других газов.

Пиролиз (сухая перегонка) – термическое разложение химического соединения. Сырьем служат природные и попутные газы, легкие бензины прямой гонки. Условия процесса 800-900 °С, давление, близкое к атмосферному и разбавление сырья водяным паром. Характерные реакции при пиролизе: расщепление углерод-углеродных связей, дегидрогенизации, полимеризации, изомеризации, конденсации.

Синтез-газ – смесь монооксида углерода и водорода. В промышленности получают паровой конверсией метана, парциальным окислением метана, газификацией угля

Карбонизация – термическая обработка предварительно подготовленного сырья без доступа воздуха. В процессе карбонизации большая часть гетереатомов (кислород, водород, сера, азот и др.) удаляется в виде газообразных продуктов, содержание углерода увеличивается, и развивается структура плоских ароматических колец, объединяющихся в основные структурные единицы или элементарные графитовые кристаллиты.

Электрический пробой — явление резкого возрастания тока в твёрдом, жидком или газообразном диэлектрике (или полупроводнике) или воздухе, возникающее при приложении напряжения выше критического (напряжение пробоя)¹

Напряжение пробоя – это минимальное напряжение, необходимое для того, чтобы заставить изолятор провести некоторое количество электричества.

Триинг – это каналовидные образования дендритных кристаллов в изоляции

Дендриты – древовидное образование в теле диэлектрика

Электроразряд–совокупность процессов, возникающих при протекании электрического тока через вещество

Теплопроводность — способность материальных тел проводить энергию (теплоту) от более нагретых частей тела к менее нагретым частям тела путём хаотического движения частиц тела (атомов, молекул, электронов и т.п.).

диэлектрическая проницаемость – число, показывающее во сколько раз кулоновская сила в вакууме больше такой же силы в данной среде: $\epsilon = F_{\text{вак}}/F_{\text{ср}}$. Зависит от материала среды.

Термическое разложения – процесс разложения химических соединений под воздействием температуры без применения катализаторов,

Список обозначений и сокращений

ТГИ	– твердое горючее ископаемое
ПГУ	– подземная газификация угля
ОМУ	– органическая масса углерода
V^{daf}	– летучие вещества
W^{daf}	– влажность
A^{daf}	– зольность
$U_{\text{пр}}$	– напряжение пробоя
ЧР	– частичный разряд
T	– температура, К
$E_{\text{кр}}$	– критическое поле
V	– объем, м ³
H°	– энтальпия
S°	– энтропия Дж/(моль·К)]
Φ^{**}	– энергия Гиббса, Дж/(г·К)
C_p	– удельная теплоемкость, Дж/(г·К)]
k	– константы скорости
k_0	– предэкспоненциальный множитель
E	– энергия активации;.
T	– абсолютная температура
K_T	– тепловая проводимость тепломера
f	– частота, Нз
$\tilde{\epsilon}$	– диэлектрическая проницаемость
ω	– удельная теплопроводность
$\text{tg}\delta$	– тангенс угла диэлектрических потерь
σ	– электропроводность, См/см
α	– степень превращения ОМУ
$E_{\text{д}}, E_{\text{в}}$	– Напряженность диэлектрика,

Список использованных источников

1. Ермагамбет, Б.Т. Чистые угольные технологии: теория и практика: монография/Б.Т. Ермагамбет, Б.К. Касенов, Н.С. Бектурганов и др.– Караганда: изд-во «TENGRİ», 2013 г. – 275 с.
2. Зорина, Г.И. Современное состояние технологии газификации угля за рубежом / Г.И. Зорина. – Москва, 1986. – 86 с.
3. Степанов, С.Г. Промышленные технологии переработки угля: Перспективы использования в Канско-Ачинском угольном бассейне: монография / Красноярский гос.университет, 2002. – С.61.
4. Теплогенерирующие установки: учеб. для вузов / Г. Н. Делягин, В. И. Лебедев, Б. А. Пермяков. – М.: Стройиздат, 1986.
5. Дьякова, М.К., Лозовой А.В. Гидрогенизация топлива. Под ред. акад. С.С Наметкина. – М.-Л.: Изд. АН СССР, 1980. – 270 с.
6. Карпенко, Е.И. Эколого-экономическая эффективность плазменных технологий переработки твердых топлив [текст] / В.Е. Мессерле, В.Н. Чурашев. и др. – Новосибирск: Наука, 2000. – 159 с.
7. Патент РФ. Способ плазменного воспламенения пылеугольного топлива [Текст] / Карпенко Е.И., Мессерле В.Е., Перегудов В.С. – № 2210700 опубл. 20.08.03, Бюлл. № 23.
8. Karpenko, E.I. Plasma-Fuel Systems for Enhancement Coal Gasification and Combustion [text] / V.E. Messerle, A.B. Ustimenko // Abstracts of Work-in-Progress Poster Presentations of 30th International Symposium on Combustion – University of Illinois at Chicago, July 25-30. – 2004. – 5F4-03. – P. 423.
9. Рапопорт, И.Б. Искусственное жидкое топливо. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Гостоптехиздат, 1955. – 546 с.
10. Каржев, В.И. В кн: Химия и технология искусственного жидкого топлива и газа / В.И. Каржев, Д.И. Орочко; Тр. ВНИГИ. – М.-Л.: Гостоптехиздат, 1951. – Вып. 3. – С. 71-116.
11. Кричко, А.А. Нетопливное использование углей / А.А. Кричко, В.В. Лебедев, И.Л. Фарберов – М.: Недра, 1978. – 215 с.
12. Кричко, А.А. В сб: Получение синтетических топлив из углей / А.А. Кричко. –Тр. ИГИ. – М.: ИОТТ, 1980. – С. 3-6.
13. Шиллинг, Г.Д. Газификация угля / Г.Д. Шиллинг, Б. Бонн, У. Краус; Пер. с нем. и ред. С.Р. Исламова. – М: Недра, 1986. – 366 с.
14. Химические вещества из угля / Пер. с нем. Под ред. Ю.Фальбе. – М: Химия, 1980. – 616 с.

15. Бекаев, Л.С. Мировая энергетика и переход к устойчивому развитию / Л.С. Бекаев, О.В. Марченко, С.П. Пинегин и др. – Новосибирск: Наука, 2000. – 300 с.
16. Крапчин, И.П. Уголь сегодня, завтра / И.П. Крапчин, Ю.С. Кудинов – М.: новый век, 2001. – 215 с.
17. Masters, S. D. World Petroleum Congress, Buenos Aires / S. D. Masters // 1991. –Vol. 9. – No. 6.
18. Ramain, P. // Cah. fr. – 1988. – № 236. – P. 15.
19. Химическая технология твердых горючих ископаемых: Учеб. Для вузов/Под ред. Г.Н Макарова, Г.Д. Харламповича. - М.: Химия. 1986. – 496 с.
20. Wild, W. H. // Erdol-Erdgaz-Kohle. – 1989. – № 3. – С. 101.
21. Symp. on Coal and C1 Chemistry, Zao, Miyagi, Japan, October 1998. –P. 1-4.
22. Oil and Gas J., 1993, April 12. – P. 85.
23. Extended Abstracts and Programme of Symp. «Science and Technology of Carbon», Strasbourg, France, July 1998. – V. II. – 894 p.
24. Pinto, F / Franco C. Fuel. – № 15-17. – 2003. – Т. 82. – С.1967-1976.
25. Кричко, А.А., Рос.хим. ж. (Ж. Рос. хим.о-ва им. Д.И. Менделеева) / А.А. Кричко, А.С. Малолетнев // – 1997. – Т. 41. – № 6. – С. 16-22.
26. Батенин, В.М. Химия и природосберегающие технологии использования угля [текст] / Бутсов В.С., Лапидус А.Л. и др. – Звенигород: Сб. тр. Международной научной конференции. – 1999. – С. 36.
27. Prospects for coal science. Proc. 12th Int. Conf. on Coal Science (ICCS'03) Cairus, Australia, 2-6 November. – 2003. – V. I. – 963 p.
28. Степанов, С.Г. Разработка автотермических технологий переработки угля: автореф. дис ... докт. техн. наук: 01.04.14 / С.Г. Степанов. – Красноярск. – 2003. – 40 с.
29. Kelly, M. J. Modern Power Systems / M. J. Kelly // – 1987. – V. 7. – № 1. – P. 13.
30. Патент РФ, МКИ С 10 J 3/46. Способ получения синтез-газа из водоугольной суспензии [текст] / Диденко А. Н., Кондратьев А. С.
31. Zhou, Hong-cang. Jin Bao-sheng – Reneng dongli gongcheng / Zhou, Hong-cang // – № 3. – 2004. – Т.19. – С. 252-255.
32. Chen, Xin / Zhang Ji-Yu, Lin Ju – Ranliao huaxue xuebao. – № 5. – 2005. –Т.33. – С. 544-549.
33. Nishiyama, Y. Proc. of the 6th Japan-China Symp. on Coal and C1 Chemistry, Zao, Miyagi, Japan, October 1998. – 393 p.

34. Zdenec, B. Sokolowska, U. HTW Fluidized-bed Gasification for 400 MW IGCC Power Plant, Vresova–Czech republic// Proc. Gasification Technologies Conf., San Francisco, Calif., Oct. 2000. – 8 p.
35. Hartiniati, S. Proc. of the 6th Japan-China Symp. on Coal and C1 Chemistry, Zao, Miyagi, Japan, October 1998. – P. 180-183.
36. Shi Shidong, Jin Jiadi. Proc. Int. Symp. on Clean Coal Technology / Shi Shidong, Jin Jiadi // Xiamen, China, 1997. – p. 500-505.
37. Нагорнов, А. Н. Исследование и разработка технологии газификации малозольных углей в плотном слое под давлением при паровоздушном дутье [Текст]: дисс. ... канд.тех.наук – Барнаул, 2010. – 147 с.
38. Otto, O. // Glukauf. 1983. – V. 119. – С. 335.
39. Мастепанов, А.М. Некоторые особенности оценки ресурсного потенциала нетрадиционных источников газа / А.М. Мастепанов, А.Д. Степанов, С.В. Горевалов, А.М. Белогорьев // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. – 2013. – №4. – С.43-48.
40. Якушев, В.С. Перспективы вовлечения в промышленную разработку метана угольных пластов / В.С. Якушев, Е.В. Перлов, В.А. Истомин // Газовая промышленность, 2003. – №1. – С.44-47.
41. Васючков, Ю.Ф. Угольный метан – важнейший природный энергоресурс / Васючков, Ю.Ф. // ООО «ИРЦ Газпром». – М., 2001. – С.24.
42. Скафа, П.В. Опыт гидравлического разрыва пласта каменного угля/ П.В. Скафа, А.В. Дмитриев // Подземная газификация углей. – 1958. – №2. – С.51-59.
43. Федоров, Н.А. Исследование процесса гидравлического разрыва каменноугольных пластов на глубине больше 250 м / Н.А. Федоров, А.В. Дмитриев, С.В. Лукьянов и др. // Труды ВНИИПодземгаза. – 1962. – Вып.6. – С.66-78.
44. Гидравлический разрыв пласта (ГРП) [Электронный ресурс] // Neftegaz.ru [портал]. URL: https://neftegaz.ru/tech_library/view/4421-Gidravlicheskiy-razryv-plasta-GRP (дата обращения 10.05.2018).
45. Забурдяев, В.С. Зарубежный опыт промысловой добычи угольного метана и ее перспективы в Кузнецком бассейне / В.С. Забурдяев // Уголь, 2003. №2. – С.21-24.
46. Bimbar inflatable packers [Электронный ресурс] // Geopro.be [портал]. URL: http://www.geopro.be/images/docs/en/71User_Manual.pdf (дата обращения 10.05.2018).
47. Крылов, Н.А. Проблемы добычи метана из угольных пластов / Н.А. Крылов, В.П. Ступаков // Газовая промышленность. – 2002. – №11. – С.26-29.

48. Крейнин, Е.В. Уголь как основное органическое топливо XXI века: экологически чистые угольные технологии / Е.В. Крейнин // Уголь. – 2003. – №5 – С.45-48.
49. Гарипов, Т.Т. Моделирование процесса гидроразрыва пласта в пороупругой среде / Т.Т. Гарипов // Математическое моделирование. – 2006. – Т.18. – №6. – С.53–69.
50. Weyermars, R. Barnett at DFW provides lessons on shale gas projects at US airports/ R. Weyermars // Oil and Gas Journal. – 2013. – V. 111. – Issue 8. – p. 22–27.
51. Сагинов, А.С. Газотехнологические методы добычи метана / А.С. Сагинов, К.Н. Адиллов, Ш.У. Ахметбеков. – Караганда, КУБUP, 2001. – Под общ. ред. академика НАН РК А.С. Сагинова. – 190 с.
52. Пармузин, П. Н. Зарубежный и отечественный опыт освоения ресурсов метана угольных пластов: монография / П. Н. Пармузин. – Ухта : УГТУ, 2017. – 109 с.
53. Крейнин, Е.В. Подземная газификация угольных пластов / Е.В. Крейнин, Н.А. Фёдоров, К.Н. Звягинцев – М.: Недра, 1982.
54. Кириченко, И.П. Способ и устройство для газификации ископаемых углей непосредственно в недрах земли. Авторское свидетельство на изобретение №28274. Дата приоритета 12.11.1930. Опубликовано 30.12.1932.
55. Крейнин, Е.В. Нетрадиционные термические технологии добычи трудноизвлекаемых топлив: уголь, углеводородное сырье / Е.В. Крейнин – М: Наука. – 2004. – 300 с.
56. Крейнин, Е.В., Сильверстов Л.К. Научные исследования подземной газификации угля в Испании (по программе Европейского Союза) / Е.В. Крейнин, Л.К. Сильверстов // Уголь. – 2000. – №2. – С.62-64.
57. Крейнин, Е.В. Подземная газификация угольных пластов и требуемые инвестиции по ее реализации / Е.В. Крейнин // Уголь, 2003. – №10. – С.52-53.
58. Крейнин, Е.В. Подземная газификация угольных пластов как наиболее эффективный вариант экологически чистой угольной технологии в топливной энергетике / Е.В.Крейнин, Е.П. Грабская // Неделя горняка-2002. – Семинар №15.
59. Крейнин, Е.В. Техничко-экономические перспективы подземной газификации угля / Е.В. Крейнин // Неделя горняка-2002. –Семинар № 19.
60. Pittman, R.W. Fontaine M.F. In situ production of hydrocarbons including shale oil. 1984. – U.S. Patent 4 487 260.
61. Van Meurs P., DeRouffiguan E.P., Vinegar H.J., and Lucid M.F. Conductively heating a subterranean oil shale to create permeability and subsequently produce oil. 1989. – U.S. Patent 4 886 118.
62. Nicolas Kalmar. In situ recovery oil from oil shale. 1984. – U.S. Patent 4 444 258.

63. Crowson, F.L. Method and apparatus for electrically heating a subsurface formation. 1971. – U.S. Patent 3 620 300.
64. Orkiszewski, J. Hill, J.L. McReynolds, P.S. and Boberg, T.C. Method and apparatus for electrical heating of oil-bearing formations. 1964. – U.S. Patent 3 149 672.
65. Osborne, J.S. In situ oil shale process. 1982. – U.S. Patent 4 401 162.
66. Little, W.E. and McLendon T.R. Method for in situ heating of hydro carbonaceous formations. 1987. – U.S. Patent 4 705 108.
67. Gill, W.G. Electrical method and apparatus for the recovery of oil. 1972. – U.S. Patent 3 642 066.
68. Segalman, D.I. Electrode well method and apparatus. 1986. – U.S. Patent 4 567 945.
69. Gipson, L.P., and Montgomery, C.T. Method for increasing the production of petroleum from a subterranean formation penetrated by a wellbore. 1977. – U.S. Patent 5 620 049.
70. Саймингтон, В.А., Томас, М.М., Пасси, К.Р. и др. Способ обработки подземного пласта для конверсии органического вещества в извлекаемые углеводороды. 2009. – Патент РФ 2 349 745.
71. Vinegar, H.J., Sandberg, C.L., Harris, C.K. et al. High voltage temperature limited heaters. U.S. Patent 2013043029. Published 2013-02-21.
72. Фоулер, Т.Д., Сэндберг, Ч.Л., Шебер, В., Винигар, Х. Способ конверсии in situ с использованием нагревающей системы с замкнутым контуром. 2009. – Патент U.S. 011 905.
73. Саламов, А.А. Паровые установки с газификацией топлива / А.А Саламов // Теплоэнергетика. – 2002. – № 6. – С. 74.
74. Потопенко, И.О. Перспективы производства экологически чистого топлива для электростанции на основе газификации углей / И.О. Потопенко // Химия твердого топлива № 6. – 2003. – С. 85-92.
75. Школлер, М.Б. Полукоксование каменных и бурых углей. – Новокузнецк: Инженер. академия России. Кузбас. филиал, 2001. – 232 с.
76. Уилсон, К.Л. Уголь – мост в будущее: Пер. с англ. – М.: Недра, 1985. – 264 с.
77. Липович, В.Г., Калабин Г.А., Калечиц И.В. и др. Химия и переработка угля. – М.: Химия, 1988. – 336 с.
78. Буткин, В.Д. Проблемы переработки и комплексного использования канско-ачинских углей / В.Д. Буткин, И.И. Демченко // Горная промышленность. – 2001. – № 1. – С. 45-49.
79. Федосеев, С.Д., Чернышев А.Б. Полукоксование и газификация твердого топлива. М.: 1960. – 326 с.

80. Carapellucci, R. Performance of integrated gasification combined cycle power plants integrated with methanol synthesis processes / R. Carapelluci, G. Cau, D. Cocco // *Journal of Power and Energy*. – 2001. – Vol. 215, No 3. – P. 347-356.

81. Celik, M.S. A new physical process for desulfurization of low-rank coals / M.S. Celik, I. Yildirim // *Fuel*. – 2000. – Vol. 79, No 13. – P. 1665-1669.

82. Gasification of Solid and Liquid Fuels for Power Generation: Technology Status Report on Cleaner Coal Technology Programme. – London: Depart. of Trade and Industry, 1999. – 14 p.

83. Fang, M. A multi-product cogeneration system using combined coal gasification and combustion / M. Fang, Z. Luo, X. Li // *Energy*. – 1998. – Vol. 23, No 3. – P. 203-212.

84. Phillips, G. Gasification offers integration opportunities and refinery modernization. – London: Foster Wheeler Energy, Ltd, Oct. 2001. – 15 p.

85. Pian, C.C.P. Development of a high-temperature air-blown gasification system / C.C.P. Pian, K. Yoshikawa // *Bioresource Technology*. – 2001. – Vol. 79. – No 3. – P. 231-241.

86. The Wabash River Coal Gasification Repowering Project: Topical Report. No 7. – Washington: US DOE, Nov. 1996. – 22 p.

87. Karpenko, E.I. Plasma-fuel system for environment and economy indexes of pulverized Coal incineration and gasification Improvement [text] / E.I. Karpenko, V.E. Messerle, A.B. Ustimenko // *Proceeding of Seventh International Conference on Energy for a Clean Environment – Lisbon, Portugal, 2003*. – CD of Proceedings. – N 32.09; Book of Abstracts. – P.171.

88. Ермағамбет, Б.Т. Глубокая переработка углей Казахстана / Б.Т. Ермағамбет, Ж.М. Касенова, Р.А. Реминный, Л.Н. Бижанова // *Журнал «Промышленность Казахстана»*, №1(82), 2014. – С. 24-28.

89. Зорина, Т.И. и др. Современные тенденции развития технологии газификации твердого топлива / Т.И. Зорина // *Химия твердого топлива*. – 2006. – №3. – С. 82-93.

90. Касенов, Б.К. Теплостойкость сланцев Кендырлыкского и Шубаркольского месторождений / Б.К. Касенов, Ж.И. Сагинтаева, Б.Т. Ермагамбет, Ш.Б. Касенова, А.А. Сейсенова, А.Т. Ордабаева // *Известия Национальной Академии наук Республики Казахстан. Серия химии и технологии*. 4(412), июль-август 2015 г. Алматы, НАН РК. – С.56-60.

91. Касенов, Б.К. Теплофизические характеристики углей и углистых пород различных пластов разреза «Северный» АО «РосЭкибастууголь» / Б.К. Касенов, Б.Т. Ермагамбет, Г.Ж. Макитова // *ХТТ*. 1998. – № 5. – С. 86-90.

92. Касенов, Б.К. Исследование теплостойкости Шубаркульского угля в интервале 303-448 К / Б.К. Касенов, Б.Т. Ермагамбет, А.Т. Ордабаева, Е.С. Мустафин // *ХТТ*. 1995. – № 1. – С. 44-46.

93. Касенов, Б.К. Теплофизические характеристики углей и углистых пород различных пластов разреза «Северный» АО «РосЭкибастузуголь» / Б.К. Касенов, Б.Т. Ермагамбет, Г.Ж. Макитова // ХТТ. 1998. – № 5. – С. 86-90.
94. Касенов, Б.К. Характеристики угля Кушмурунского месторождения / Б.К. Касенов, Б.Т. Ермагамбет, Ж.И. Сагинтаева // ХТТ. – 2014. – № 3. – С. 3-4.
95. Платунов, Е.С., Буравой, С.Е., Курепин, В.В., Петров, Г.С. Теплофизические измерения и приборы. – Л.: Машиностроение, 1986. – 256 с.
96. Техническое описание и инструкции по эксплуатации ИТ-С-4. – Актюбинск: Актюбинский завод «Эталон», 1986. – 48 с.
97. Термические константы веществ. Справочник / Под ред. В.П. Глушко. – М.: Наука, 1981. – Вып. X. – Ч.1. – 144 с.
98. Спиридонов, В.П., Лопаткин, Л.В. Математическая обработка экспериментальных данных. – М.: Изд-во МГУ, 1970. – 221 с.
99. Robie, R.A., Hewingway, B.S., Fisher, I.K. Thermodynamic Properties of Minerals and Related Substances at 298.15 and (105Paskals) Pressure and at Higher Temperature. Washington: United States government printing office, 1978. – 456 p.
100. Жумадилов, Е.К. Исследование электрофизических свойств хромита $GdSrCr_2O_{5,5}$ / Е.К. Жумадилов, С.Ж. Давренбеков, Е.С. Мустафин, Б.К. Касенов, С.Т. Едильбаева // Вестник НАН РК. – 2004. – № 5. – С. 114-118.
101. Фесенко, Е.Г. Семейство перовскита и сегнетоэлектричество. – М.: Атомиздат, 1972.
102. Веневцев, Ю.Н., Политова, Е.Д., Иванов, С.А. Сегнето- и антисегнетоэлектрики семейства титаната бария. – М.: Химия, 1985.
103. Лайнс, М., Гласс, А. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы. – М.: Мир, 1981.
104. Bekturganov, N.S. Research of kinetics of thermal decomposition of coal of Kazakhstani deposit / N.S. Bekturganov, B.T. Yermagambet, Zh.M. Kassenova, B.K. Kassenov, N.U. Nurgaliyev, L.N. Bizhanova // CPSI Journal a magazine by the coal preparation society of India. Conference Proceedings. Coal Beneficiation 2015, Conference & Expo. Индия. – С. 17-21.
105. Гюльмалиев, А.М., Головин, Г.С., Гладун, Т.Г. Теоретические основы химии угля. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2003. – 556 с.
106. Шевкопляс, В.Н. Расчет основных кинетических параметров твердых топлив по данным дериватографического анализа / В.Н. Шевкопляс // Вопр. химии и хим. технологии. – 2007. – № 2. – С. 179-183.
107. Скляр, М.Г. Физико-химические основы спекания углей. – М.: Metallurgy, 1984. – 201 с.

108. Popat, Y.R., Sunavala, P.D. // *Indian J. Chem. Tech.* – 1999. – V.6. – P.247.
109. ГОСТ 25495-82 Породы горные. Метод определения удельного электрического сопротивления.
110. Казарновский, Д.М., Тареев, Б.М. Испытания электроизоляционных материалов. – Л.: Энергия, 1980. – 216 с.
111. Орешкин, П.Т. Физика полупроводников и диэлектриков. – М.: Высшая школа, 1977. – 448 с.
112. Dwight Eric Kinzer. Processing hydrocarbons and Debye frequencies. US patent 7,312,428. Published 2007-12-25.
113. Кучинский, Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л: Энергия. Ленинградское отделение, 1979. – 224 с.
114. Wu, K. et al. Model for partial discharges associated with treeing breakdown: I. PDs in tree channels / K. Wu // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2000. – Т. 33. – №. 10. – С. 1197.
115. ГОСТ 20074-83. Электрооборудование и электроустановки. Метод измерения частичных разрядов.
116. Международный стандарт МЭК 60270. Методы высоковольтных испытаний – измерение частичных разрядов.
117. Champion, J.V. Simulation of partial discharges in conducting and non-conducting electrical tree structures / J.V Champion, S.J Dodd // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 34 (2001) 1235–1242.
118. Dodd, S.J. Partial Discharge Patterns in Conducting and Non-Conducting Electrical Trees / S.J. Dodd, N.M. Chalashkanov, J.C. Fothergill // 2010 International Conference on Solid Dielectrics, Potsdam, Germany, July 4-9, 2010.
119. Mason, J. H. Breakdown of solid dielectrics in divergent fields / J.H. Mason // *Proceedings of the IEE-Part C: Monographs*. – 1955. – Т. 102. – №. 2. – С. 254-263.
120. Champion, J.V. Analysis and modelling of electrical tree growth in synthetic resins over a wide range of stressing voltage / J.V Champion, S.J Dodd, G.C. Stevens // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 27 (1994) 1020–1030.
121. Perkins, Greg. "Underground coal gasification–Part I: Field demonstrations and process performance." *Progress in Energy and Combustion Science* 67 (2018): 158-187.
122. Perkins, Greg. "Underground coal gasification–Part II: Fundamental phenomena and modeling." *Progress in Energy and Combustion Science* 67 (2018): 234-274.
123. Blinderman, Michael S., and Alexander Y. Klimenko, eds. *Underground coal gasification and combustion*. Woodhead Publishing, 2017.
124. Symington, William A., et al. "Field testing of Electrofrac™ process elements at ExxonMobil's Colony Mine." 29th Oil Shale Symposium, Golden, CO, Oct. 2009.

125. Symington, William A., et al. "ExxonMobil's Electrofrac™ Process for In Situ Oil Shale Conversion." *Oil Shale: A Solution to the Liquid Fuel Dilemma*. American Chemical Society, 2010. – P.185-216.
126. Duba, A.G. Electrical conductivity of coal and coal char / A.G. Duba // *Fuel*. – 1977. – T. 56. – №. 4. – C. 441-443.
127. Balanis, C. A. Electrical properties of eastern bituminous coal as a function of frequency, polarization and direction of the electromagnetic wave, and temperature of the sample / C.A. Balanis, J.L. Jeffrey, Y.K. Yoon // *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*. – 1978. – T. 16. – №. 4. – C. 316-323.
128. Celzard, A. et al. Electrical conductivity of anthracites as a function of heat treatment temperature / A. Celzard // *Carbon*. – 2000. – T. 38. – №. 8. – C. 1207-1215.
129. Shao, Z. Electrical resistivity of coal-bearing rocks under high temperature and the detection of coal fires using electrical resistance tomography / Z. Shao // *Geophysical Journal International*. – 2015. – T. 204. – №. 2. – C. 1316-1331.
130. Ermagambet, B. T. et al. Dielectric properties of the coals of Maykuben and Ekibastuz basins / B.T. Ermagambet // *news of the national academy of sciences of the republic of Kazakhstan-series chemistry and technology*. – 2018. – №. 6. – C. 38-45.
131. Bukharkin, A.A. Electrical discharge phenomena application for solid fossil fuels in-situ conversion / A.A. Bukharkin // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2014. – T. 552. – №. 1. – C. 012012.
132. Champion, J. V. The correlation between the partial discharge behaviour and the spatial and temporal development of electrical trees grown in an epoxy resin / J.V. Champion, S.J. Dodd, J.M. Alison // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 1996. – T. 29. – №. 10. – C. 2689.
133. Vogelsang, R. Detection of electrical tree propagation by partial discharge measurements / R. Vogelsang // *15th International Conference on Electrical Machines, ICEM 2002, August 2002, Brügge, Belgium* Authors' addresses: Ruben Vogelsang, High Voltage Laboratory of the Swiss Federal Institute of Technology, Physikstrasse 3.

Приложение А

ТГ(термогравиметрическая кривая)-измерение массы образца при нагревании (синяя кривая на рисунках);

ДТГ(дифференциальная термогравиметрическая кривая)-показывает скорость разложения (зеленая кривая на рисунках);

ДСК (дифференциальная сканирующая калориметрия)-показывает тепловые эффекты (красная кривая на рисунках)

Для образцов углей:

- 1) Исходный уголь месторождения «Пятиметровый» (Сарыадыр)
- 2) Исходный уголь месторождения «Надежный» (Сарыадыр)
- 3) Исходный уголь месторождения «Майкубен» (Шоптыколь)
- 4) Исходный уголь месторождения «Богатырь» (Экибастуз)

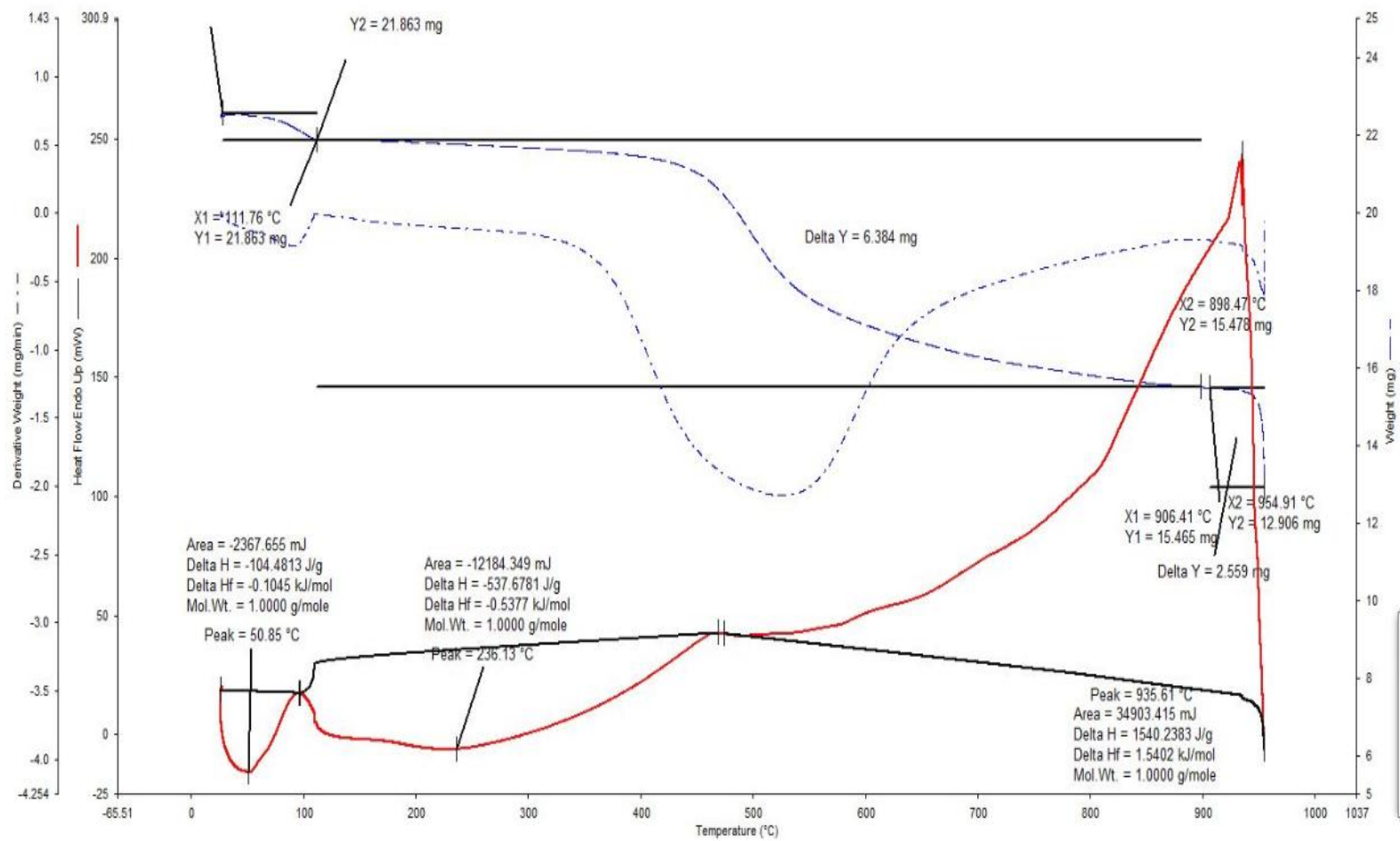


Рисунок А.1– Результаты ТГ, ДТГ и ДТА кривых уголь месторождения «Пятиметровый» (Сарыадыр)

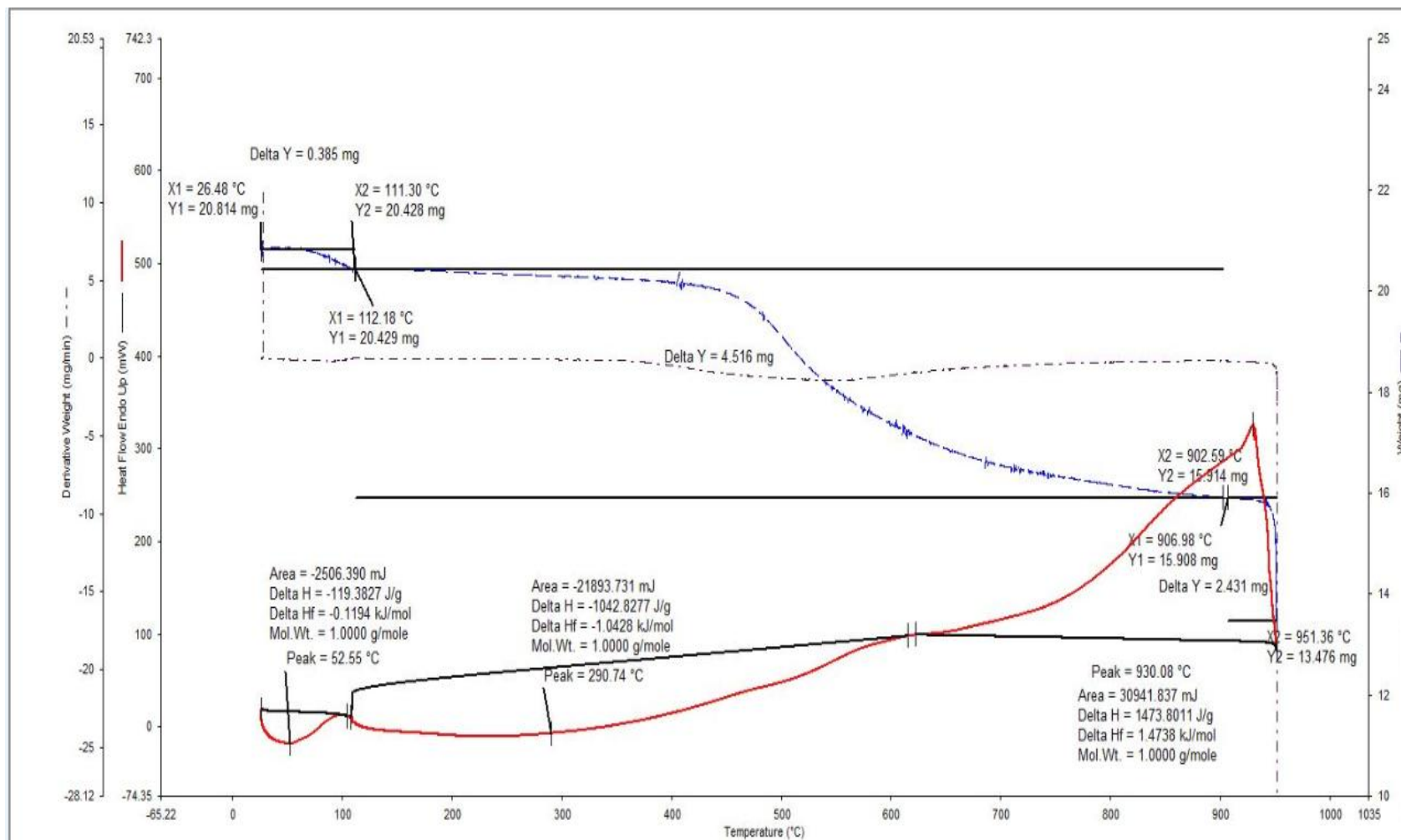


Рисунок А.2– Результаты ТГ, ДТГ и ДТА кривых уголь месторождения «Надежный» (Сарыадыр)

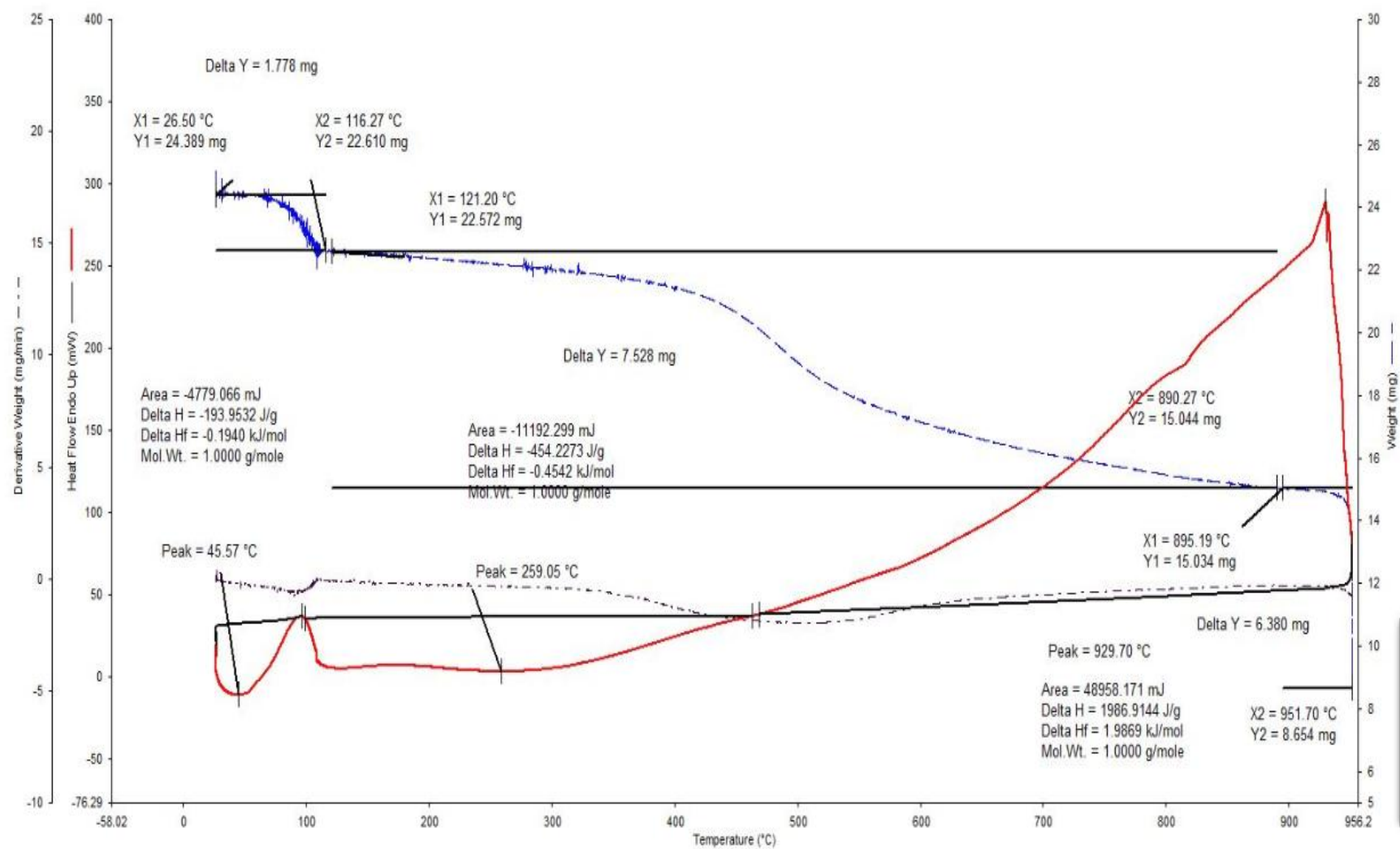


Рисунок А.3 – Результаты ТГ, ДТГ и ДТА кривых уголь месторождения «Майкубен» (Шоптыколь)

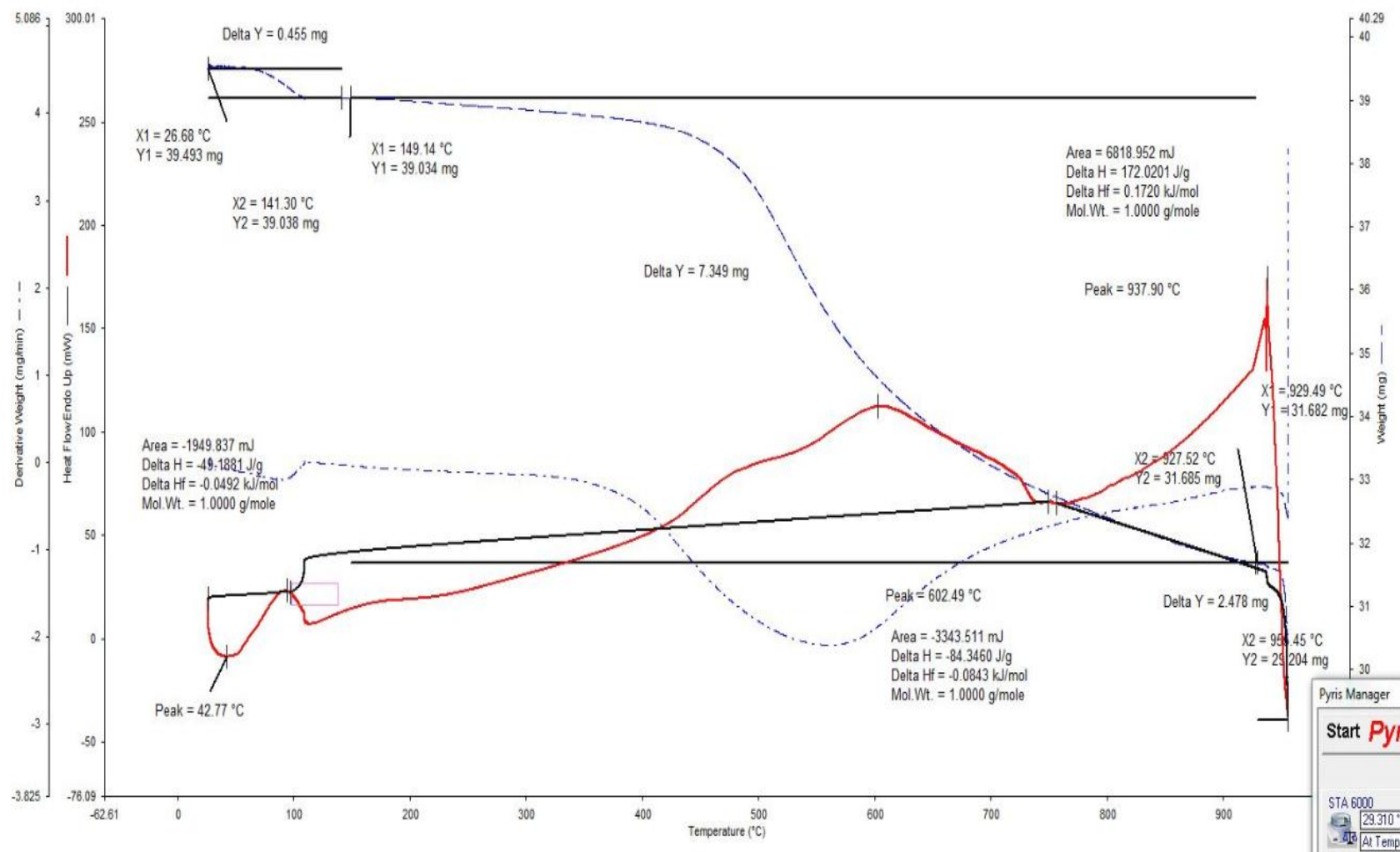


Рисунок А.4 – Результаты ТГ, ДТГ и ДТА кривых угля месторождения «Богатырь» (Экибастуз)

Приложение Б

ДТГ(дифференциальная термографическая кривая)-показывает скорость разложения (синяя кривая на рисунках);

Для образцов углей:

- 1) Исходный уголь месторождения «Пятиметровый» (Сарыадыр)
- 2) Исходный уголь месторождения «Надежный» (Сарыадыр)
- 3) Исходный уголь месторождения «Майкубен» (Шоптыколь)
- 4) Исходный уголь месторождения «Богатырь» (Экибастуз)

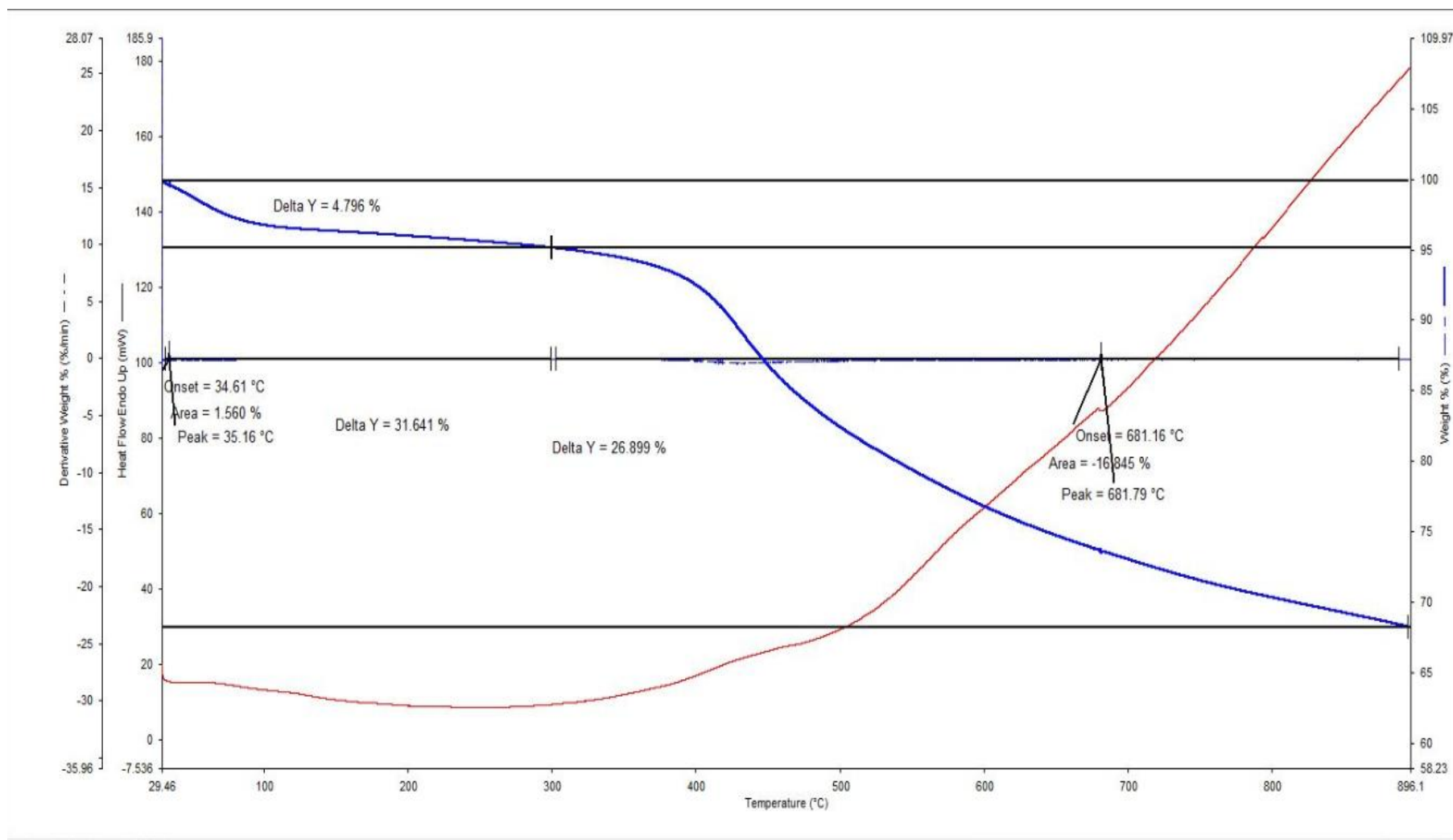


Рисунок Б.1 –ДТГ кривые для проб №1 при скорости нагрева 3⁰ С/мин

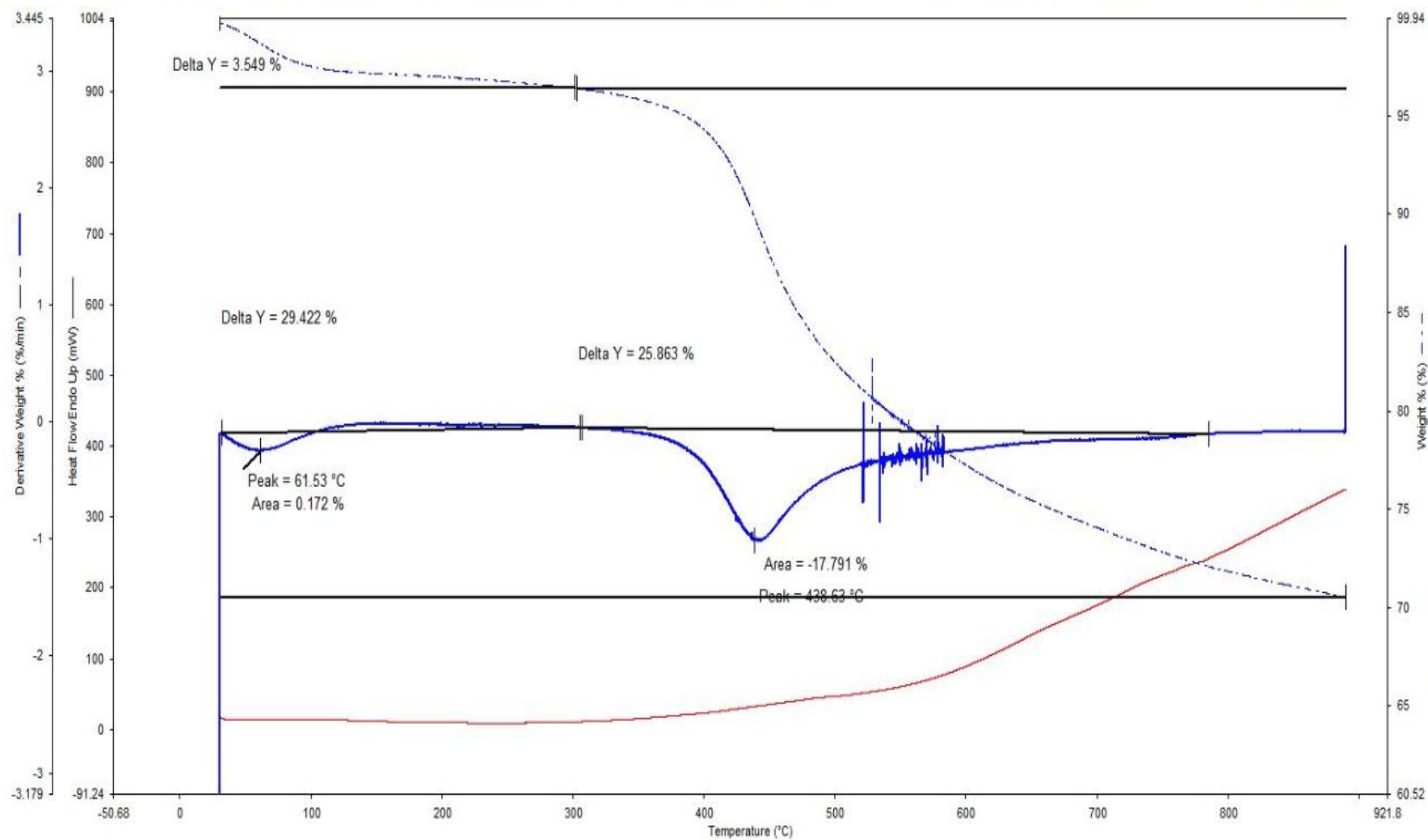


Рисунок Б.2 – ДТГ кривые для проб №1 при скорости нагрева 6⁰ С/мин

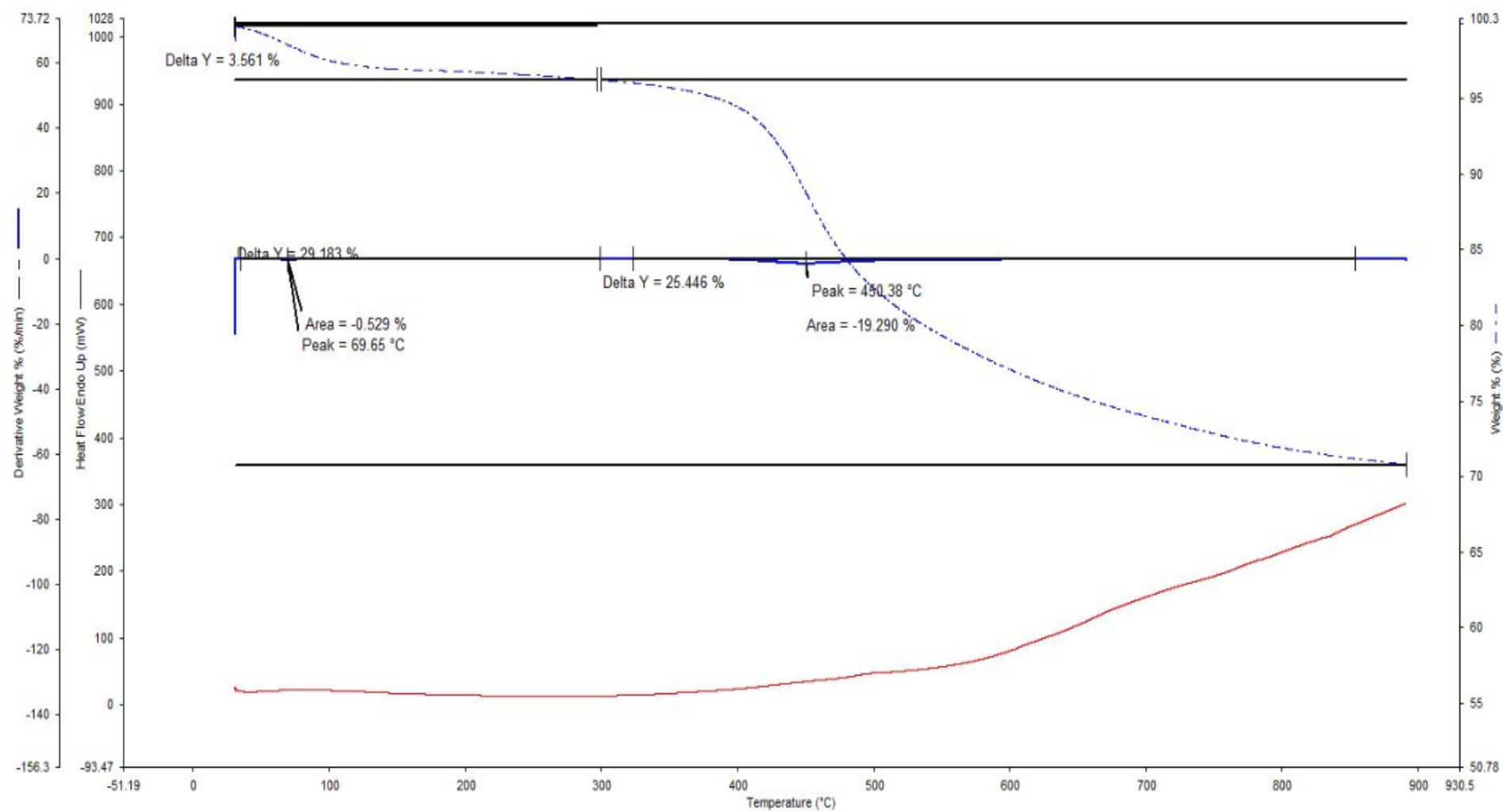


Рисунок Б.3 –ДТГ кривые для проб №1 при скорости нагрева 9⁰ С/мин

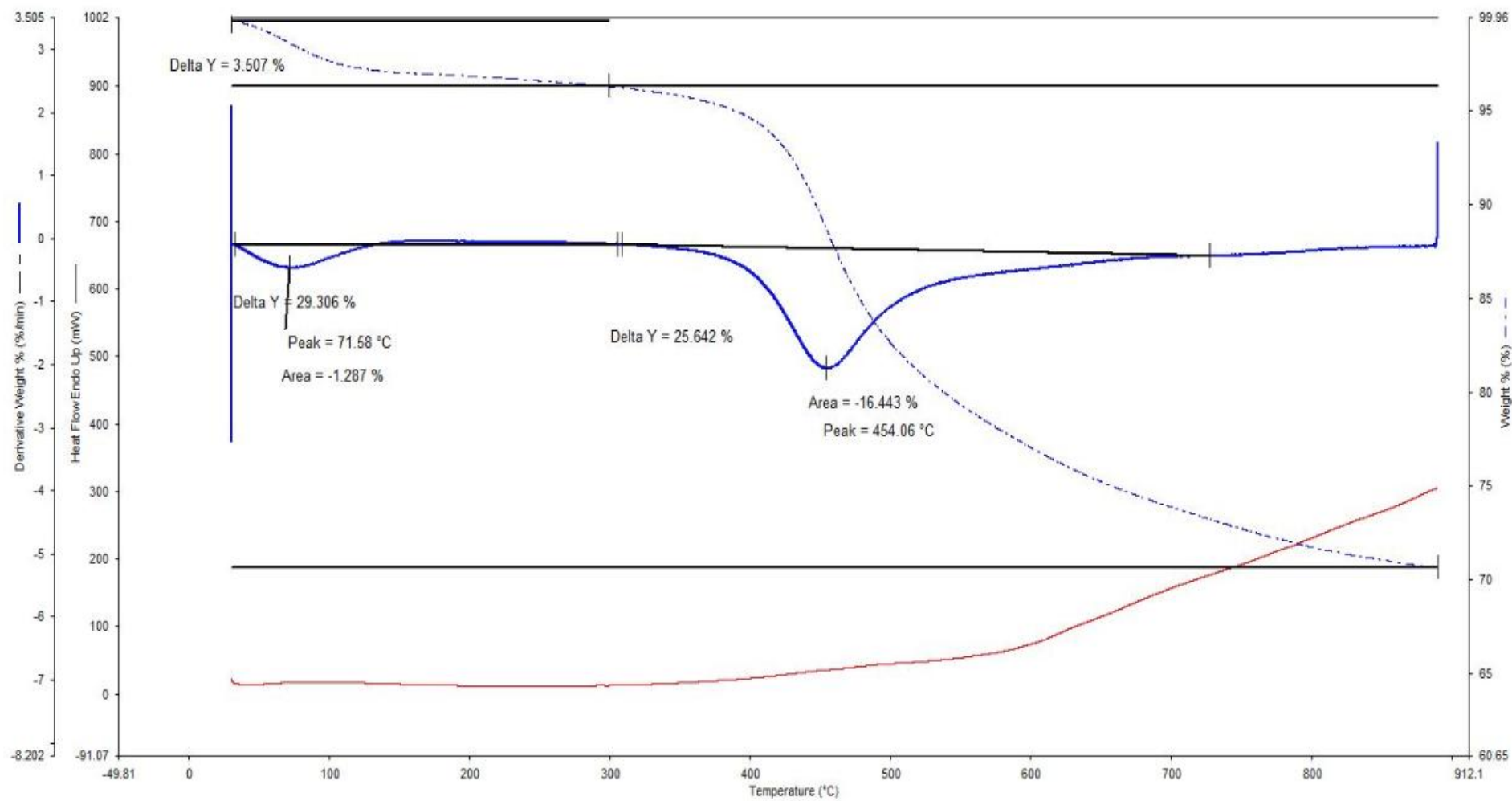


Рисунок Б.4 –ДТГ кривые для проб №1 при скорости нагрева 12⁰ С/мин

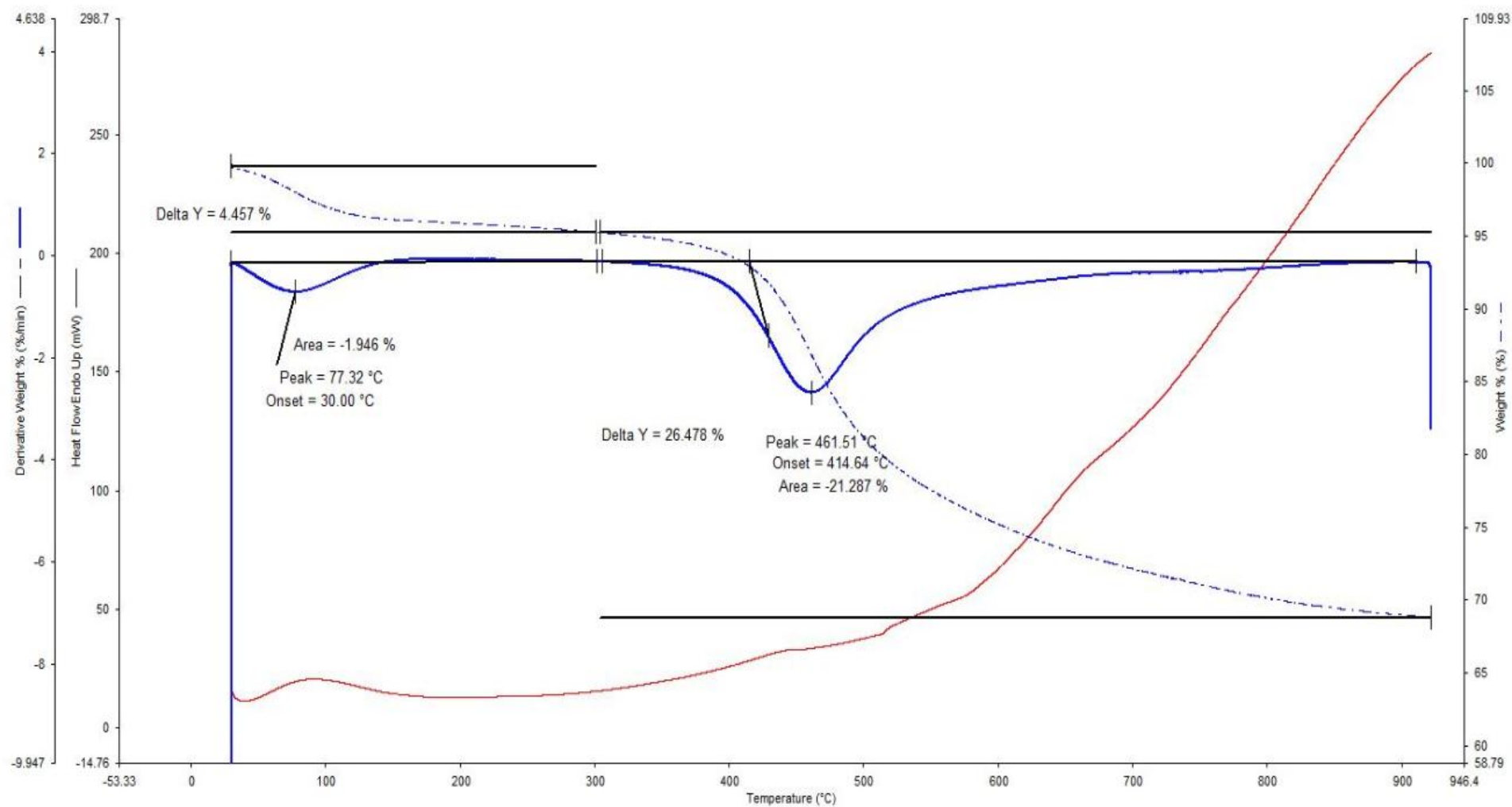


Рисунок Б.5 –ДТГ кривые для проб №1 при скорости нагрева 15⁰ С/мин

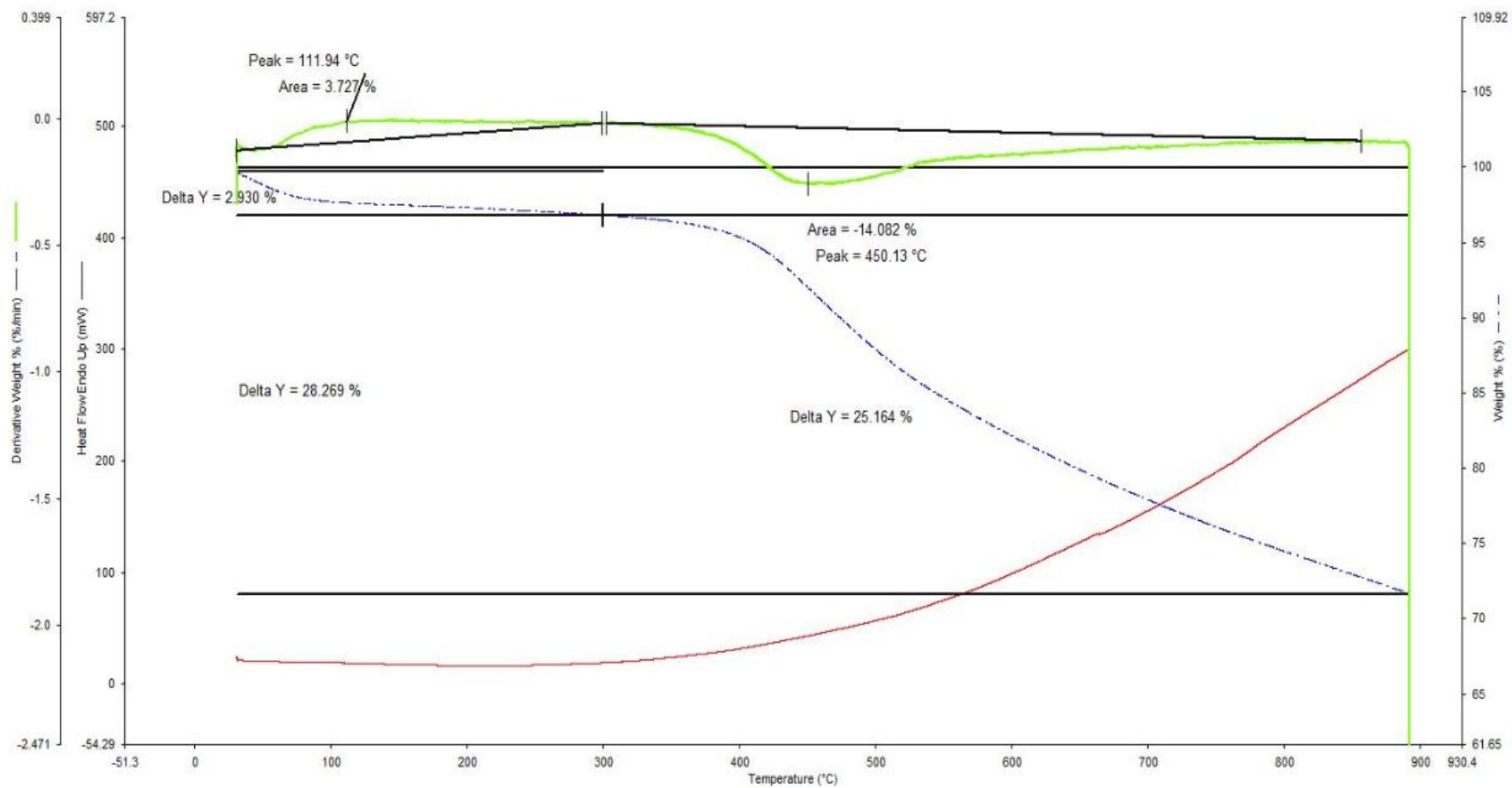


Рисунок Б.6 –ДТГ кривые для проб №2 при скорости нагрева 3⁰ С/мин

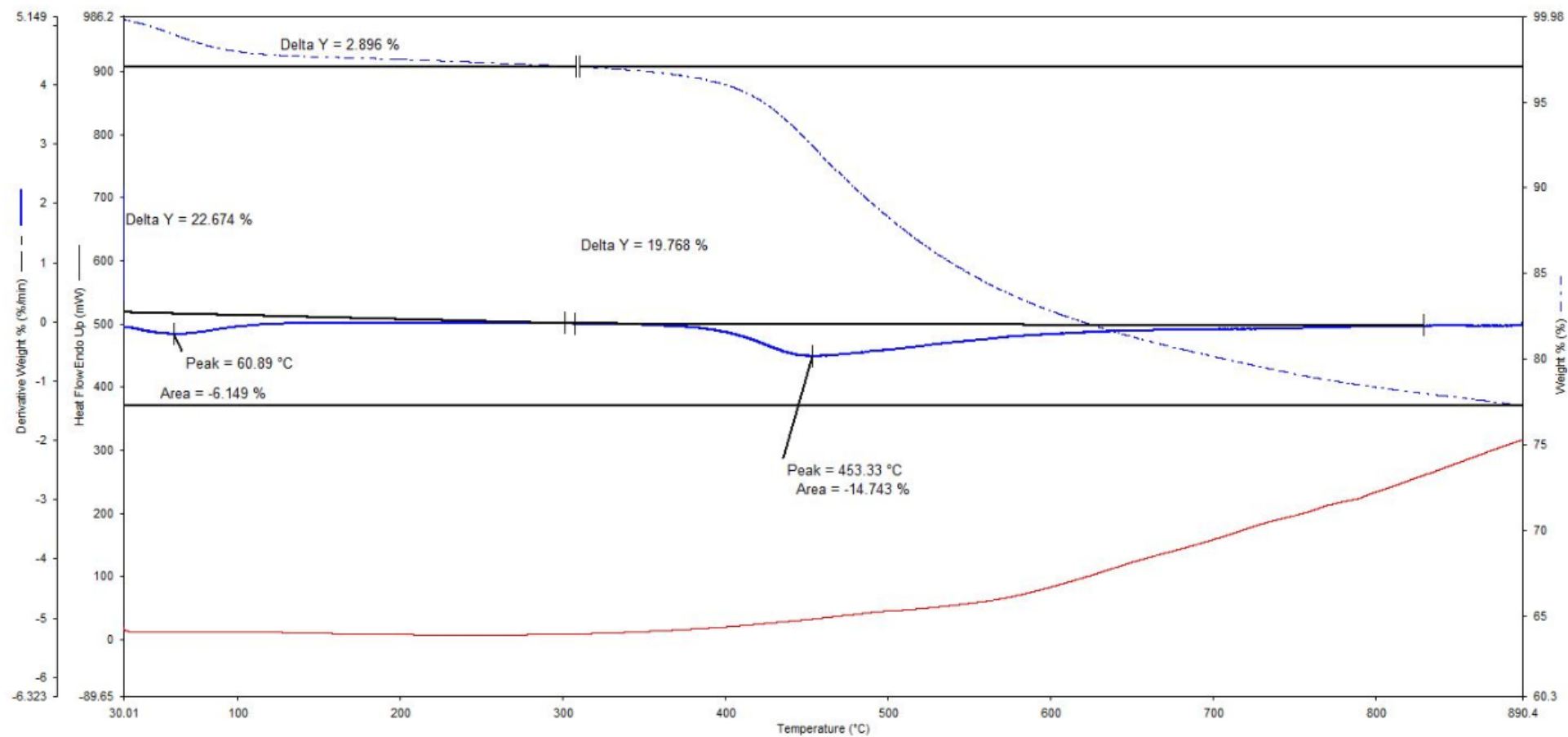


Рисунок Б.7 –ДТГ кривые для проб №2 при скорости нагрева 6⁰ С/мин

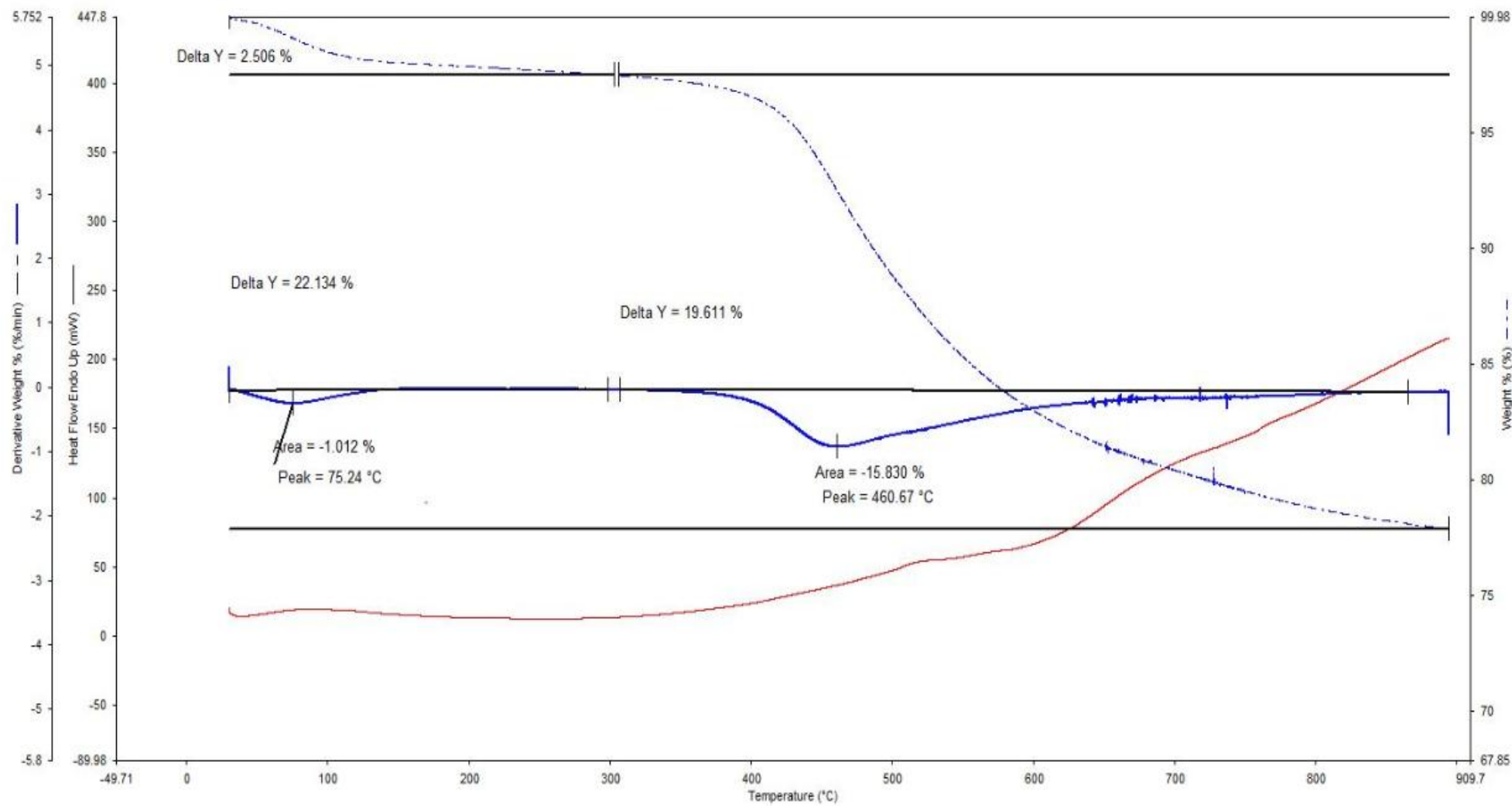


Рисунок Б.8 –ДТГ кривые для проб №2 при скорости нагрева 9⁰ С/мин

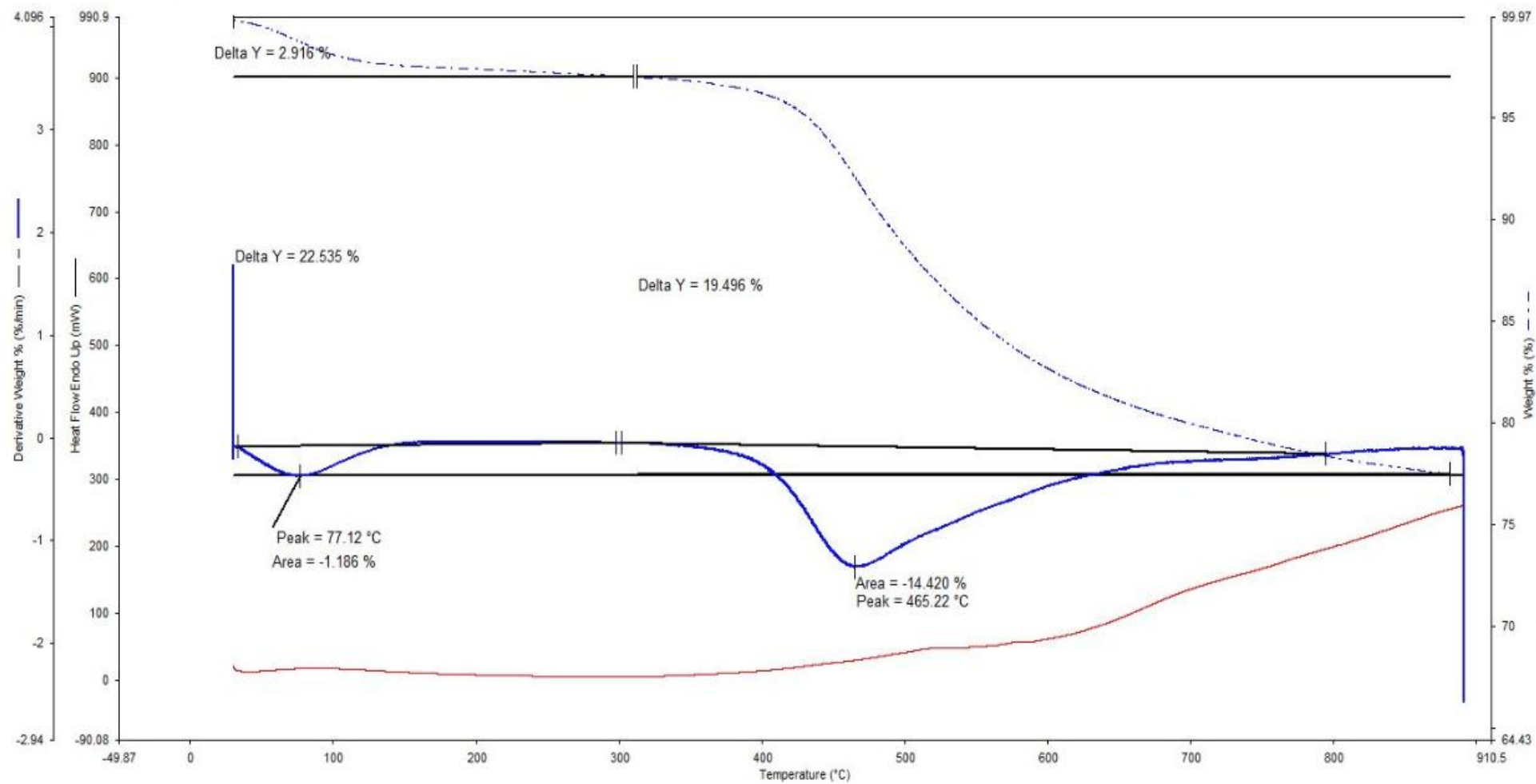


Рисунок Б.9 –ДТГ кривые для проб №2 при скорости нагрева 12⁰ С/мин

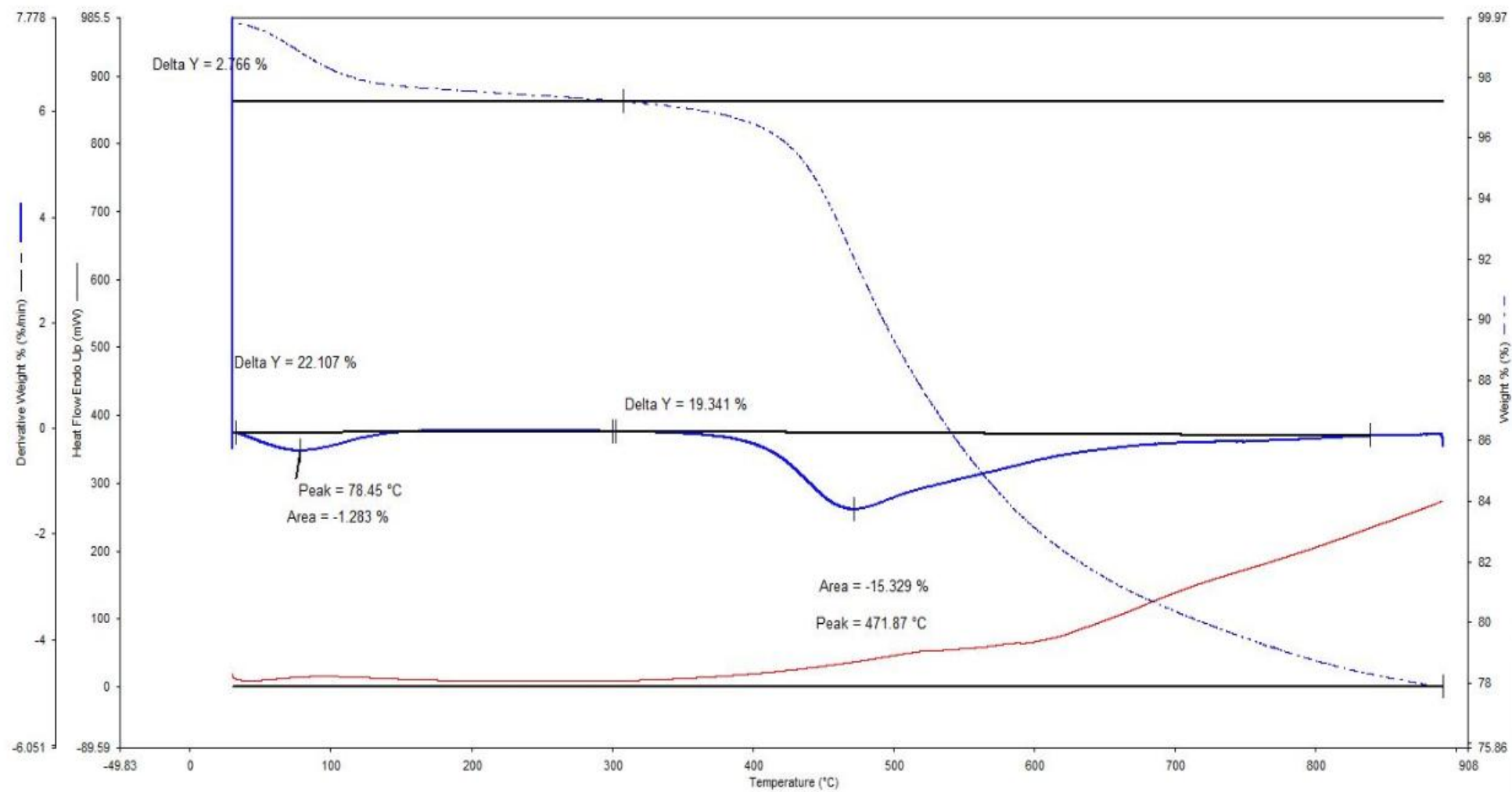


Рисунок Б.10 – ДТГ кривые для проб №2 при скорости нагрева 15⁰ С/мин

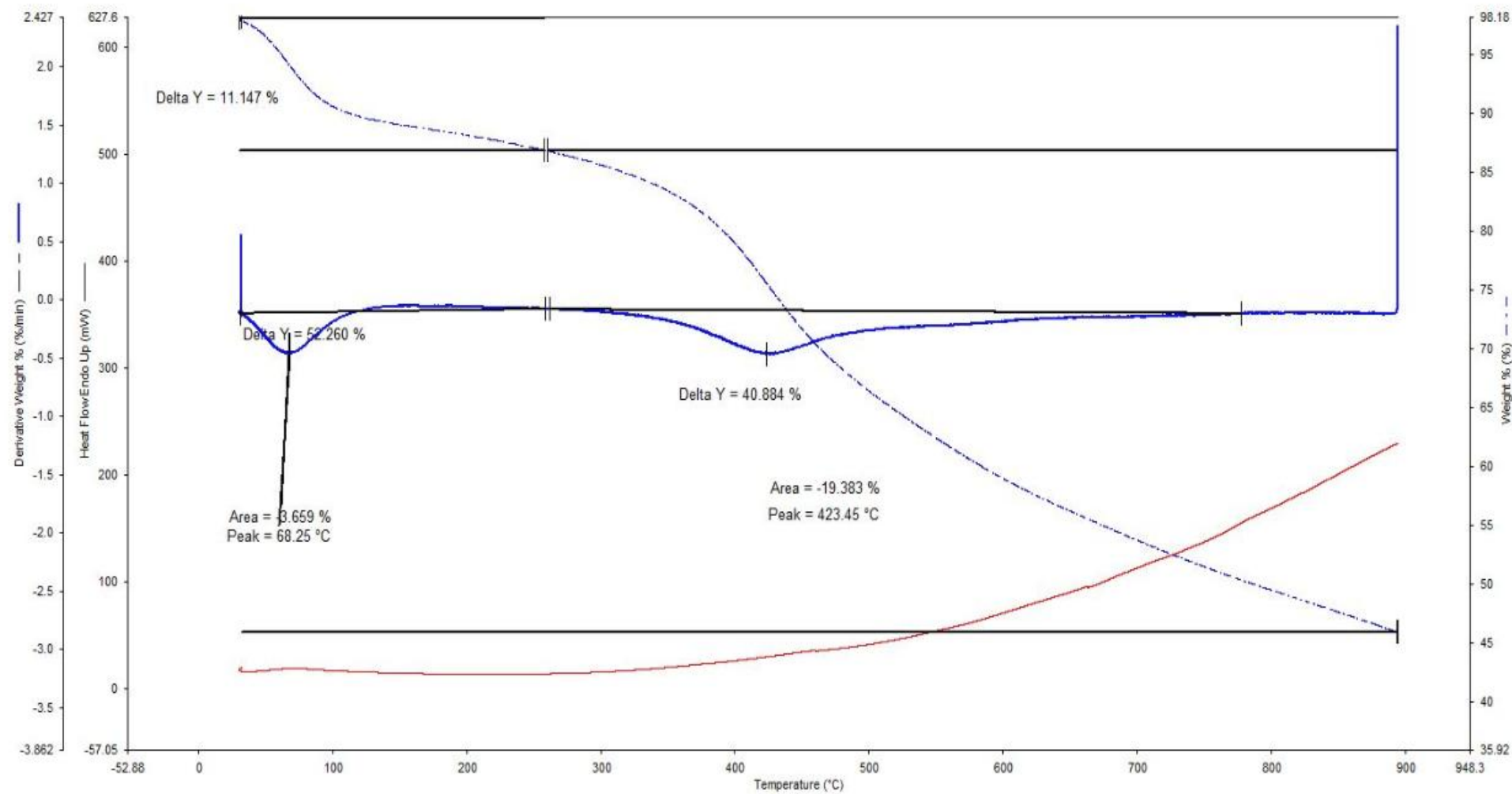


Рисунок Б.11 –ДТГ кривые для проб №3 при скорости нагрева 3⁰ C/мин

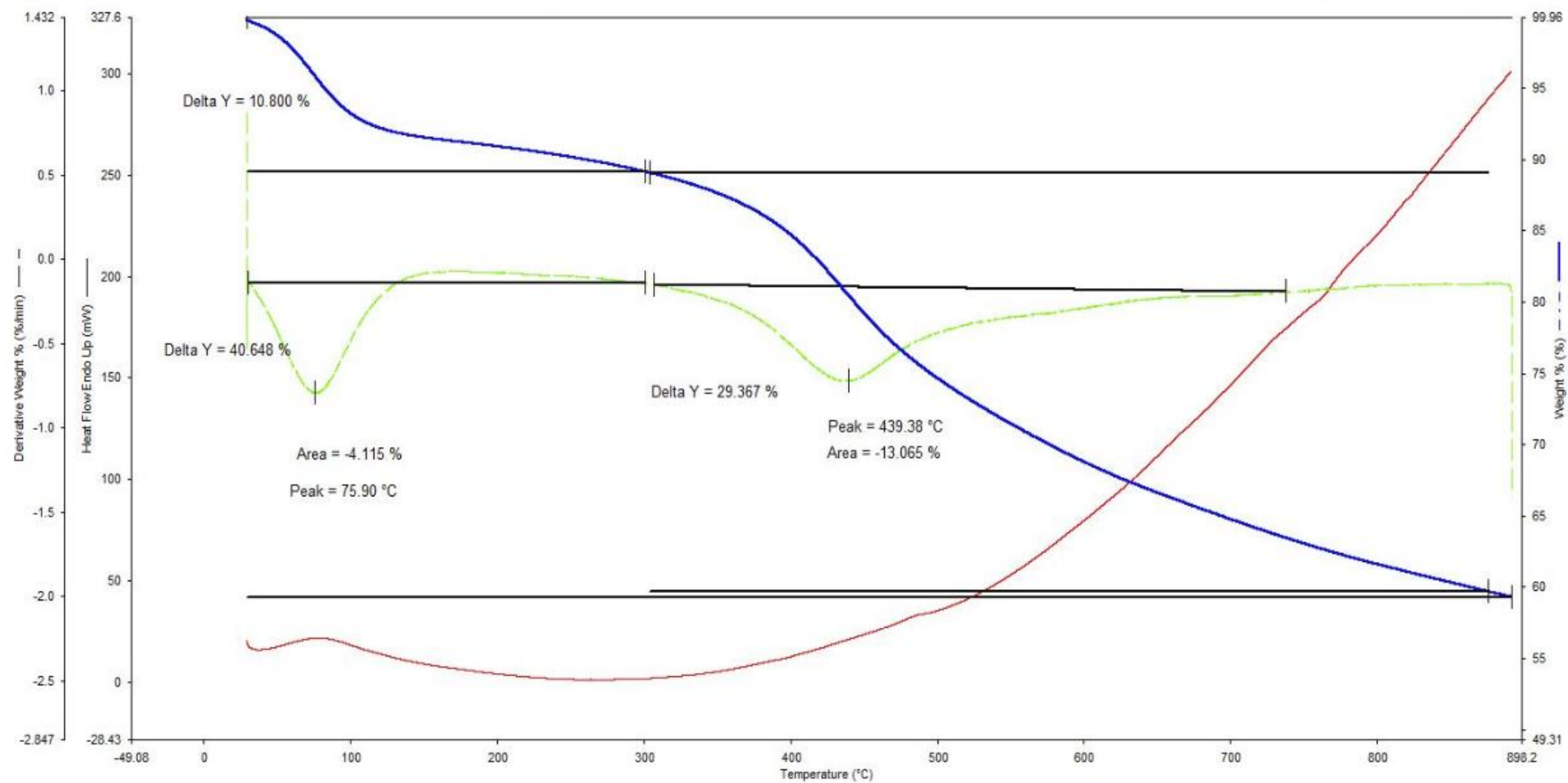


Рисунок Б.12 –ДТГ кривые для проб №3 при скорости нагрева 6⁰ С/мин

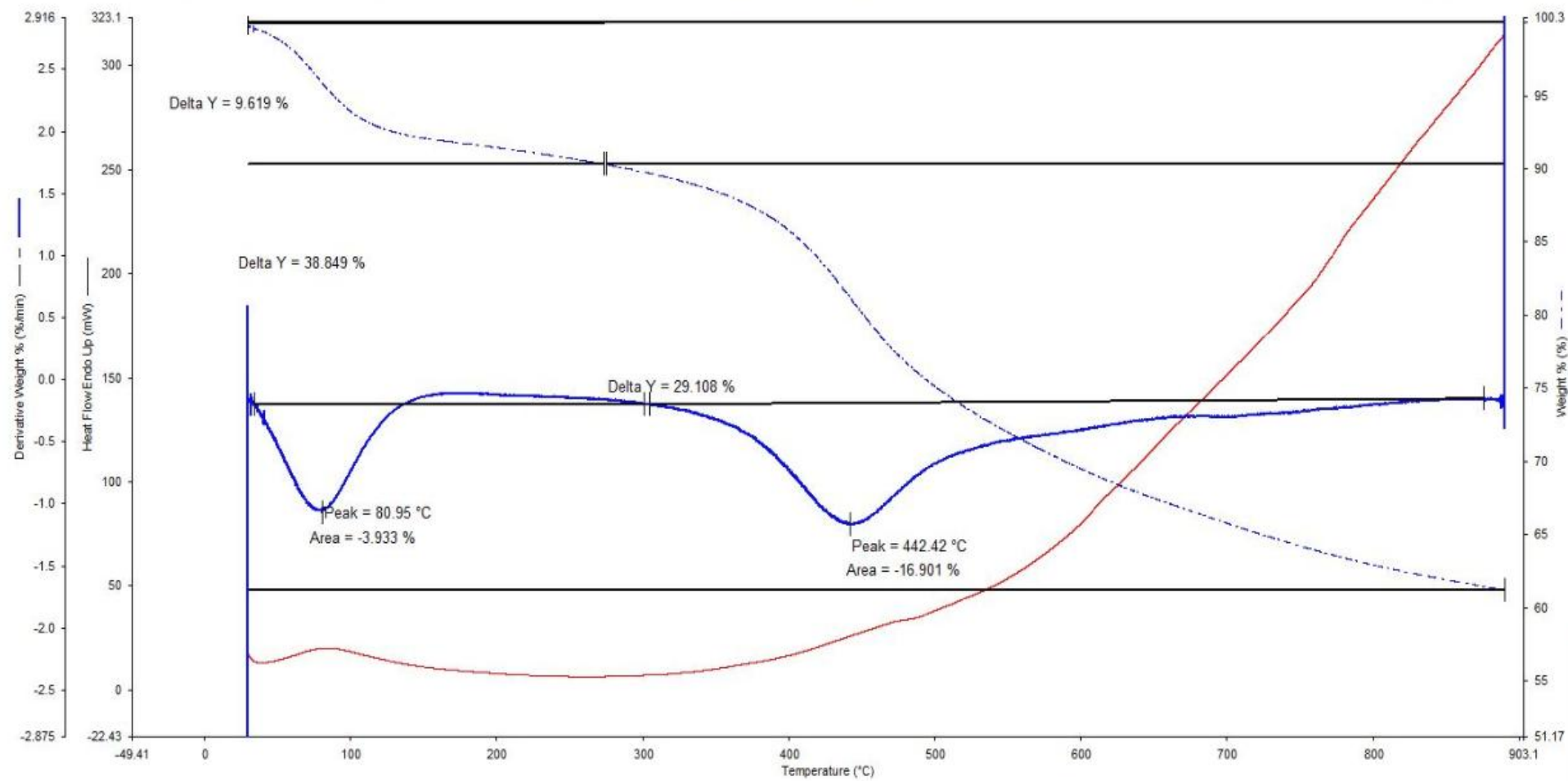


Рисунок Б.13 –ДТГ кривые для проб №3 при скорости нагрева 9⁰ С/мин

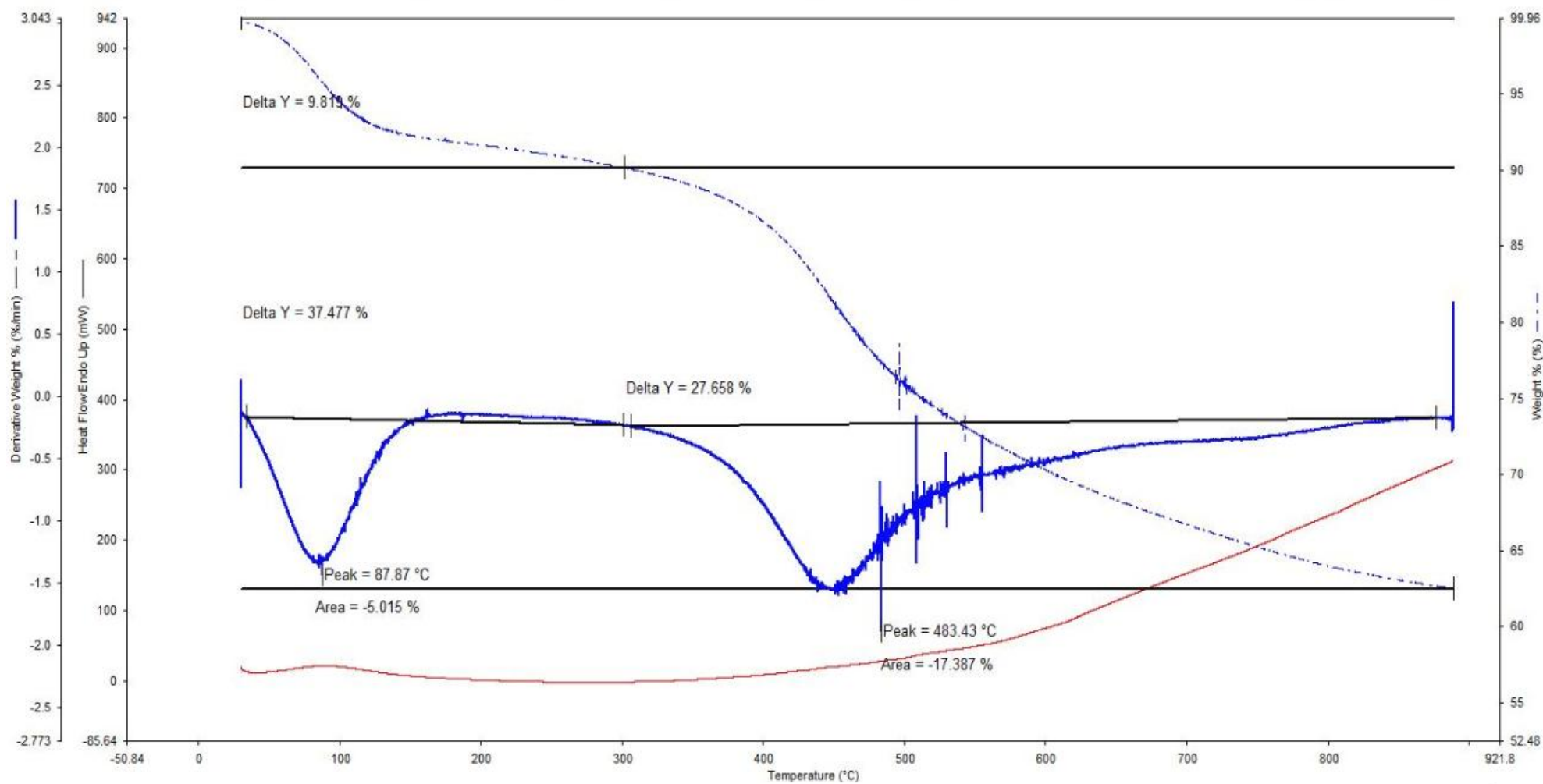


Рисунок Б.14 – ДТГ кривые для проб №3 при скорости нагрева $12^{\circ}\text{C}/\text{мин}$

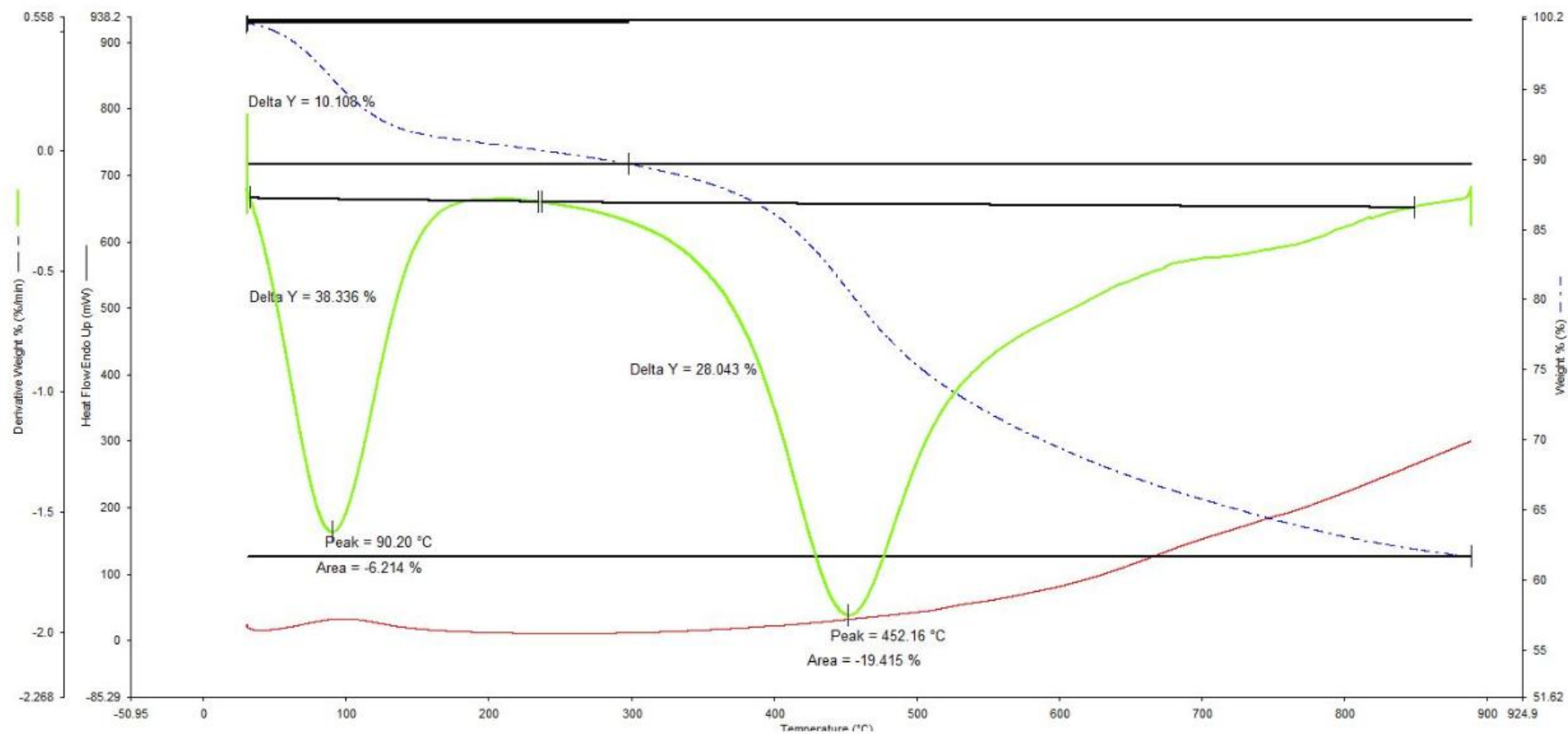


Рисунок Б.15 –ДТГ кривые для проб №3 при скорости нагрева 15⁰ С/мин

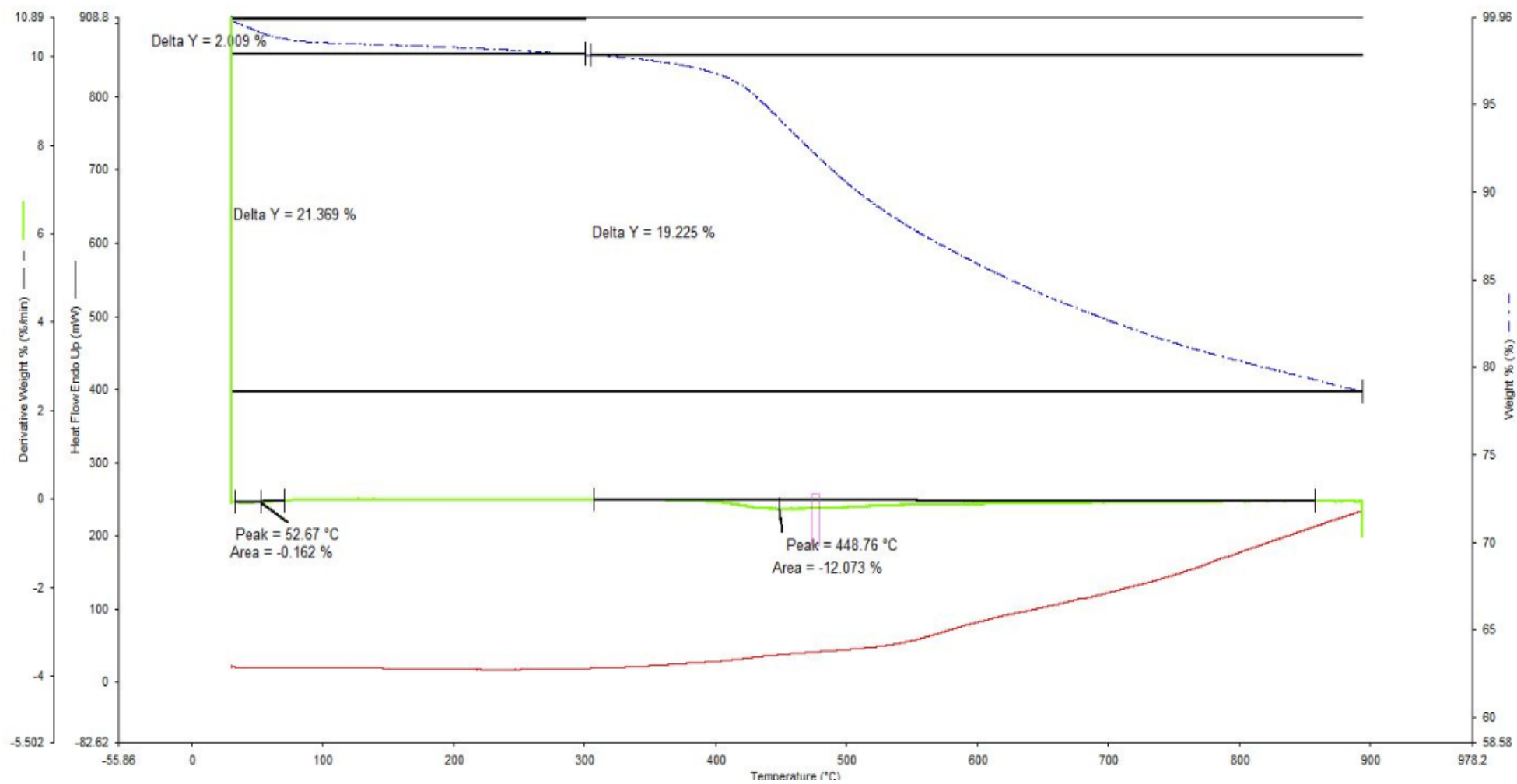


Рисунок Б.16 – ДТГ кривые для проб №4 при скорости нагрева 3⁰ С/мин

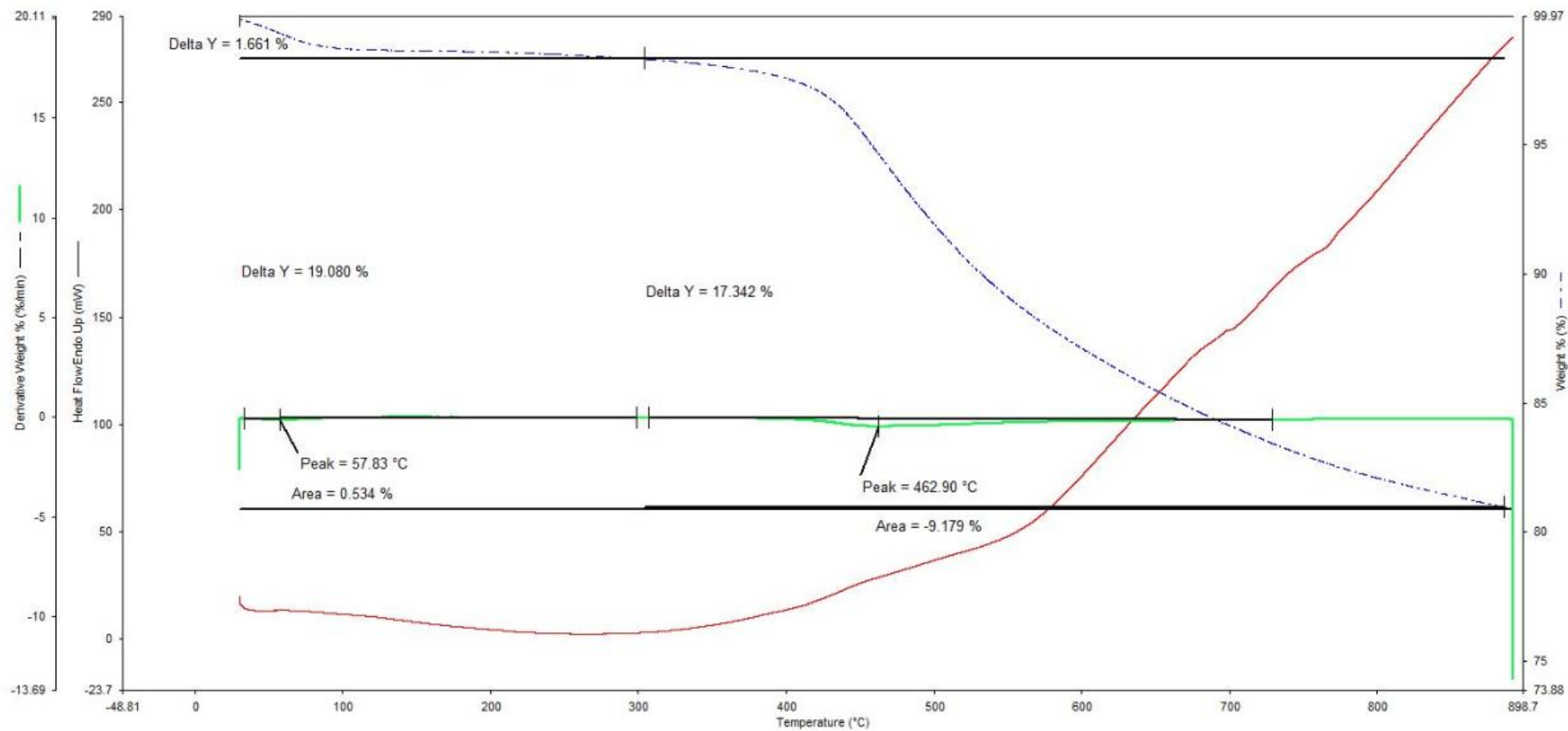


Рисунок Б.17 – ДТГ кривые для проб №4 при скорости нагрева 6⁰ С/мин

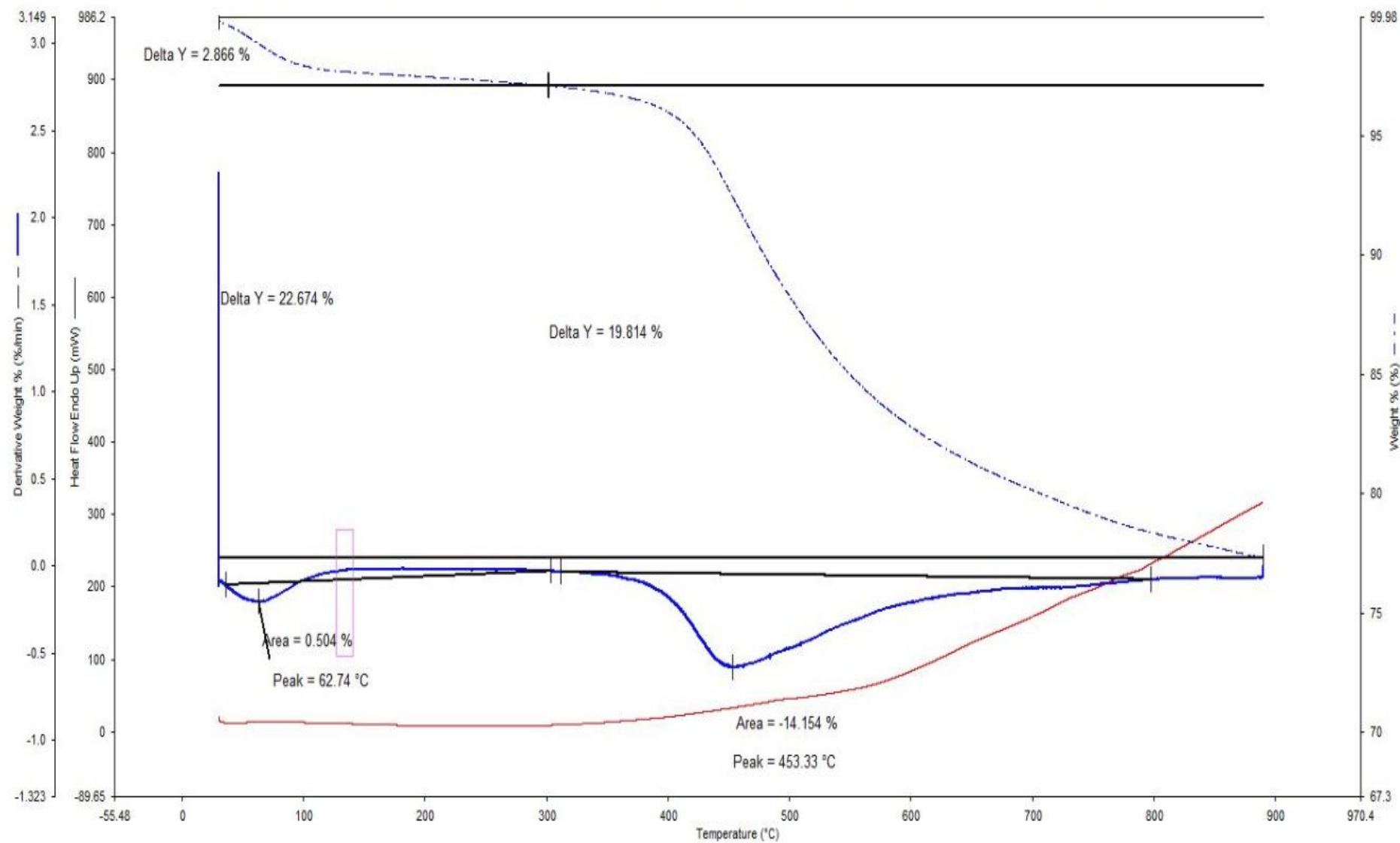


Рисунок Б.18 – ДТГ кривые для проб №4 при скорости нагрева 9⁰ С/мин

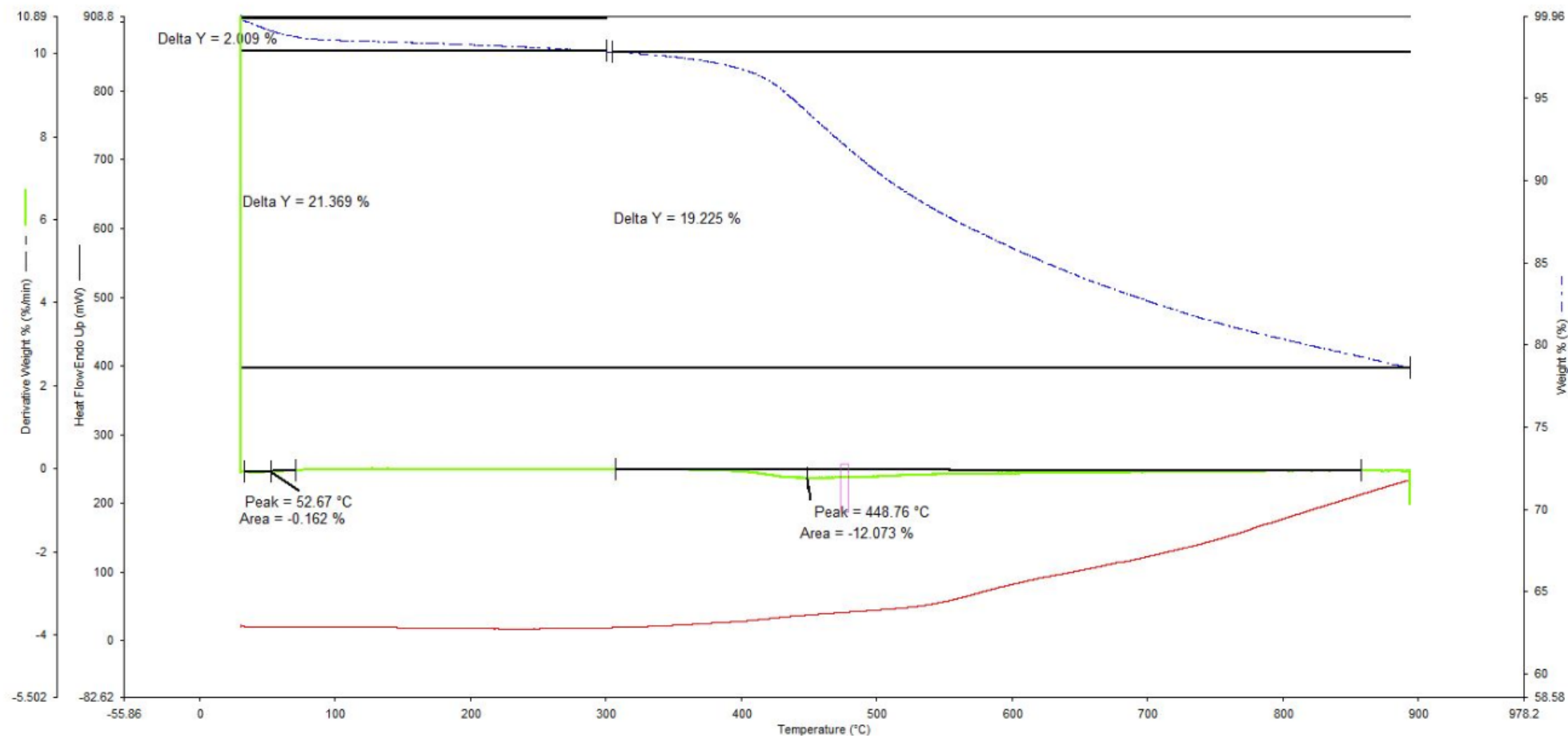


Рисунок Б.19 – ДТГ кривые для проб №4 при скорости нагрева 12⁰ С/мин

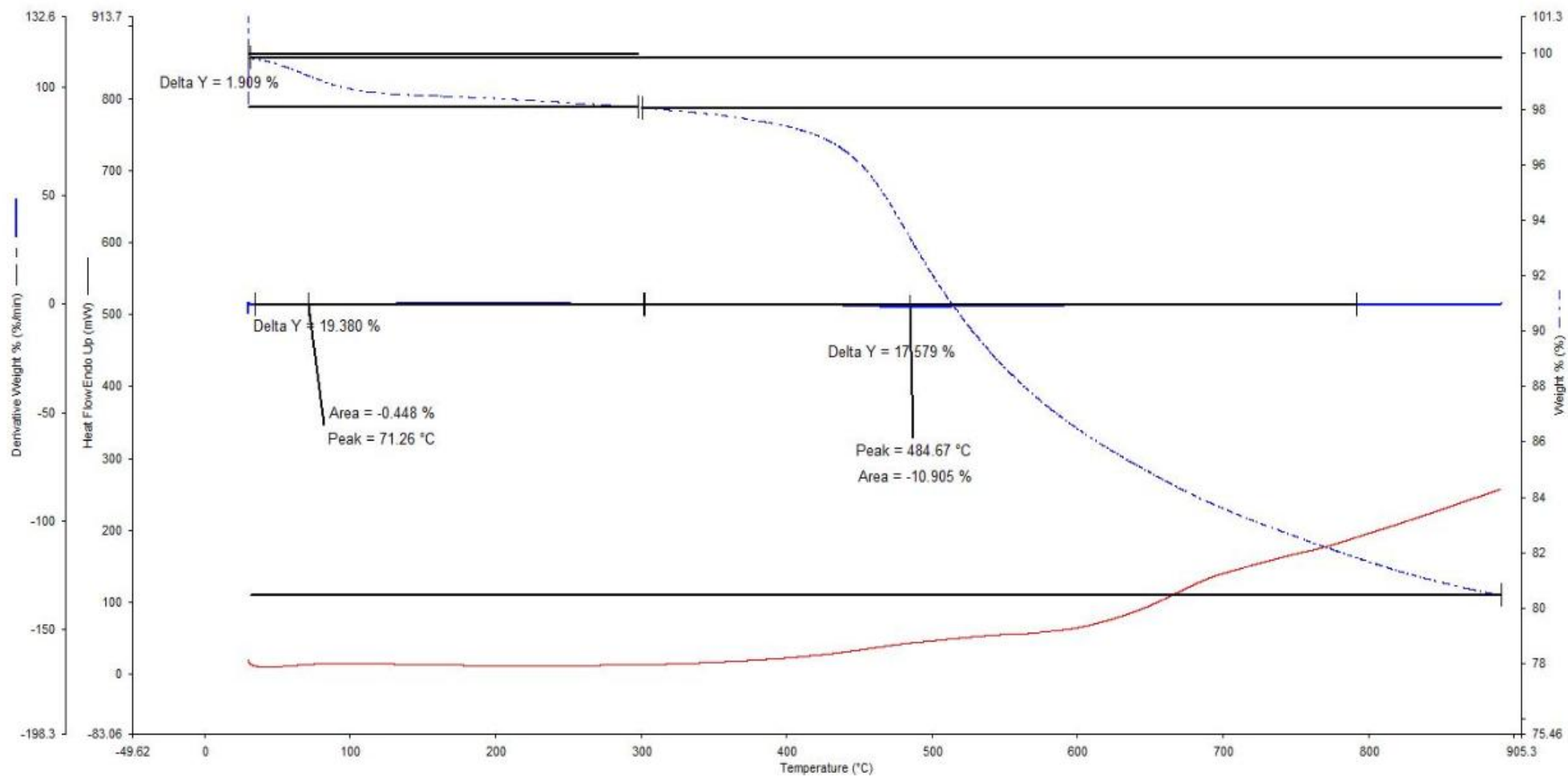


Рисунок Б.20 – ДТГ кривые для проб №4 при скорости нагрева 15⁰ С/мин

Приложение В

Таблица В.1 – Частотная зависимость электропроводности углей месторождения Богатырь

f, Hz	Электропроводность образцов, См/см						Среднее
	1	2	3	4	5	6	
25	8,25E-11	5,89E-10	8,87E-11	7,95E-10	1,02E-10	2,99E-10	3,261E-10
100	1,29E-10	1,08E-09	1,699E-10	1,16E-09	2,16E-10	5,609E-10	5,528E-10
500	4,38E-10	2,68E-09	5,864E-10	2,41E-09	8,9E-10	1,339E-09	1,392E-09
1000	8,38E-10	4,25E-09	1,106E-09	3,77E-09	1,76E-09	2,204E-09	2,323E-09
2000	1,72E-09	7,38E-09	2,161E-09	6,64E-09	3,6E-09	3,947E-09	4,241E-09
5000	4,65E-09	1,8E-08	5,539E-09	1,61E-08	9,76E-09	9,296E-09	1,055E-08
10000	1,02E-08	3,8E-08	1,162E-08	3,35E-08	2,09E-08	1,844E-08	2,211E-08
20000	2,26E-08	8,09E-08	2,482E-08	6,98E-08	4,42E-08	3,727E-08	4,66E-08
50000	6,75E-08	2,13E-07	7E-08	1,81E-07	1,15E-07	9,899E-08	1,242E-07
100000	1,55E-07	4,23E-07	1,523E-07	3,57E-07	2,29E-07	2,065E-07	2,536E-07
200000	3,33E-07	7,63E-07	3,082E-07	6,53E-07	4,18E-07	4,063E-07	4,801E-07
250000	4,27E-07	9,16E-07	3,85E-07	7,88E-07	5,04E-07	5,053E-07	5,874E-07
300000	5,23E-07	1,06E-06	4,631E-07	9,19E-07	5,87E-07	6,014E-07	6,928E-07
350000	6,22E-07	1,2E-06	5,387E-07	1,05E-06	6,68E-07	6,996E-07	7,961E-07
400000	7,21E-07	1,34E-06	6,151E-07	1,17E-06	7,48E-07	7,927E-07	8,982E-07
450000	8,2E-07	1,48E-06	6,942E-07	1,3E-06	8,29E-07	8,9E-07	1,001E-06
500000	9,23E-07	1,61E-06	7,761E-07	1,43E-06	9,1E-07	9,919E-07	1,107E-06
550000	9,9E-07	1,7E-06	8,311E-07	1,51E-06	9,67E-07	1,058E-06	1,176E-06
600000	1,08E-06	1,81E-06	8,837E-07	1,6E-06	1,02E-06	1,128E-06	1,251E-06
650000	1,19E-06	1,9E-06	9,348E-07	1,69E-06	1,07E-06	1,196E-06	1,329E-06
700000	1,28E-06	2,03E-06	1,014E-06	1,81E-06	1,14E-06	1,298E-06	1,429E-06
750000	1,35E-06	2,16E-06	1,104E-06	1,93E-06	1,23E-06	1,401E-06	1,528E-06
800000	1,44E-06	2,25E-06	1,163E-06	2,02E-06	1,28E-06	1,469E-06	1,603E-06
850000	1,6E-06	2,35E-06	1,227E-06	2,12E-06	1,34E-06	1,547E-06	1,698E-06
900000	1,74E-06	2,51E-06	1,319E-06	2,26E-06	1,43E-06	1,668E-06	1,823E-06
950000	1,82E-06	2,7E-06	1,465E-06	2,47E-06	1,57E-06	1,836E-06	1,975E-06
1000000	1,91E-06	2,87E-06	1,564E-06	2,61E-06	1,66E-06	1,962E-06	2,096E-06

Таблица В.2 – Частотная зависимость электропроводности углей месторождения Сарыадыр (пласт Надежный)

f, Hz	Электропроводность образцов, См/см						Среднее
	1	2	3	4	5	6	
25	5,43E-11	5,14E-11	3,243E-11	2,56E-11	3,845E-11	2,77E-11	3,831E-11
100	1,91E-10	1,52E-10	1,121E-10	9,329E-11	1,3E-10	8,853E-11	1,277E-10
500	9,92E-10	6,85E-10	6,527E-10	5,675E-10	7,215E-10	4,878E-10	6,845E-10
1000	2,01E-09	1,32E-09	1,364E-09	1,218E-09	1,477E-09	9,917E-10	1,398E-09
2000	4,09E-09	2,56E-09	2,847E-09	2,603E-09	2,975E-09	2,003E-09	2,846E-09
5000	1,03E-08	6,24E-09	7,517E-09	6,868E-09	7,401E-09	4,929E-09	7,207E-09
10000	2,04E-08	1,22E-08	1,541E-08	1,392E-08	1,439E-08	9,62E-09	1,433E-08
20000	3,99E-08	2,35E-08	3,052E-08	2,713E-08	2,739E-08	1,845E-08	2,782E-08
50000	9,52E-08	5,59E-08	7,218E-08	6,308E-08	6,323E-08	4,399E-08	6,559E-08
100000	1,78E-07	1,07E-07	1,338E-07	1,167E-07	1,165E-07	8,323E-08	1,226E-07
200000	3,06E-07	1,9E-07	2,287E-07	2,016E-07	2,004E-07	1,455E-07	2,119E-07
250000	3,63E-07	2,28E-07	2,717E-07	2,404E-07	2,384E-07	1,76E-07	2,53E-07
300000	4,17E-07	2,68E-07	3,123E-07	2,779E-07	2,773E-07	2,034E-07	2,926E-07
350000	4,69E-07	3,05E-07	3,523E-07	3,158E-07	3,137E-07	2,31E-07	3,31E-07
400000	5,2E-07	3,41E-07	3,924E-07	3,502E-07	3,492E-07	2,598E-07	3,687E-07
450000	5,71E-07	3,83E-07	4,336E-07	3,877E-07	3,873E-07	2,897E-07	4,087E-07
500000	6,26E-07	4,26E-07	4,789E-07	4,302E-07	4,274E-07	3,234E-07	4,518E-07
550000	6,59E-07	4,46E-07	5,042E-07	4,54E-07	4,49E-07	3,417E-07	4,757E-07
600000	6,86E-07	4,67E-07	5,218E-07	4,694E-07	4,682E-07	3,5E-07	4,938E-07
650000	7,13E-07	4,85E-07	5,403E-07	4,859E-07	4,835E-07	3,589E-07	5,111E-07
700000	7,56E-07	5,21E-07	5,819E-07	5,217E-07	5,186E-07	3,875E-07	5,478E-07
750000	8,18E-07	5,78E-07	6,391E-07	5,719E-07	5,672E-07	4,322E-07	6,011E-07
800000	8,54E-07	6,11E-07	6,652E-07	5,991E-07	5,969E-07	4,533E-07	6,299E-07
850000	8,75E-07	6,36E-07	6,886E-07	6,185E-07	6,147E-07	4,627E-07	6,492E-07
900000	9,41E-07	6,82E-07	7,399E-07	6,704E-07	6,64E-07	5,061E-07	7,006E-07
950000	1,03E-06	7,72E-07	8,128E-07	7,475E-07	7,366E-07	5,77E-07	7,8E-07
1000000	1,1E-06	8,34E-07	8,856E-07	8,023E-07	7,925E-07	6,221E-07	8,394E-07

Таблица В.3 – Частотная зависимость электропроводности углей месторождения Сарыадыр (пласт Пятиметровый)

f, Hz	Электропроводность образцов, См/см						Среднее
	1	2	3	4	5	6	
25	7,52E-10	8,62E-10	1,712E-10	1,22E-10	6,766E-11	5,3086E-11	3,38E-10
100	1,62E-09	1,81E-09	3,495E-10	2,926E-10	1,681E-10	1,3802E-10	7,296E-10
500	4,36E-09	4,45E-09	1,314E-09	1,054E-09	8,443E-10	5,8206E-10	2,101E-09
1000	6,61E-09	6,22E-09	2,457E-09	1,938E-09	1,721E-09	1,0715E-09	3,335E-09
2000	1E-08	8,81E-09	4,726E-09	3,813E-09	3,456E-09	2,0714E-09	5,488E-09
5000	1,92E-08	1,53E-08	1,193E-08	1,044E-08	8,86E-09	5,2588E-09	1,182E-08
10000	3,39E-08	2,57E-08	2,527E-08	2,32E-08	1,829E-08	1,1273E-08	2,293E-08
20000	6,54E-08	4,81E-08	5,555E-08	5,314E-08	3,89E-08	2,4748E-08	4,764E-08
50000	1,81E-07	1,32E-07	1,668E-07	1,717E-07	1,136E-07	7,5558E-08	1,401E-07
100000	4,05E-07	3,11E-07	3,768E-07	4,099E-07	2,654E-07	1,7918E-07	3,247E-07
200000	9,23E-07	7,18E-07	8,028E-07	9,678E-07	5,832E-07	4,0522E-07	7,333E-07
250000	1,19E-06	9,44E-07	1,018E-06	1,258E-06	7,494E-07	5,2691E-07	9,472E-07
300000	1,45E-06	1,18E-06	1,233E-06	1,554E-06	9,178E-07	6,5252E-07	1,165E-06
350000	1,73E-06	1,42E-06	1,45E-06	1,85E-06	1,088E-06	7,8034E-07	1,386E-06
400000	2,01E-06	1,66E-06	1,664E-06	2,151E-06	1,258E-06	9,1292E-07	1,609E-06
450000	2,28E-06	1,92E-06	1,885E-06	2,463E-06	1,431E-06	1,0506E-06	1,838E-06
500000	2,58E-06	2,18E-06	2,111E-06	2,77E-06	1,612E-06	1,1923E-06	2,073E-06
550000	2,79E-06	2,38E-06	2,284E-06	3,007E-06	1,736E-06	1,2985E-06	2,249E-06
600000	3,02E-06	2,59E-06	2,449E-06	3,26E-06	1,877E-06	1,4027E-06	2,433E-06
650000	3,27E-06	2,81E-06	2,638E-06	3,546E-06	2,02E-06	1,5113E-06	2,634E-06
700000	3,56E-06	3,07E-06	2,866E-06	3,858E-06	2,203E-06	1,6596E-06	2,87E-06
750000	3,83E-06	3,32E-06	3,076E-06	4,122E-06	2,366E-06	1,7997E-06	3,086E-06
800000	4,02E-06	3,52E-06	3,22E-06	4,327E-06	2,488E-06	1,9105E-06	3,248E-06
850000	4,29E-06	3,75E-06	3,425E-06	4,621E-06	2,629E-06	2,0283E-06	3,457E-06
900000	4,67E-06	4,11E-06	3,731E-06	5,061E-06	2,879E-06	2,2207E-06	3,778E-06
950000	5,1E-06	4,51E-06	4,079E-06	5,485E-06	3,164E-06	2,4308E-06	4,128E-06
1000000	5,44E-06	4,81E-06	4,329E-06	5,851E-06	3,356E-06	2,6228E-06	4,401E-06

Таблица В.4 – Частотная зависимость электропроводности углей месторождения Майкубен

f, Hz	Электропроводность образцов, См/см						Среднее
	1	2	3	4	5	6	
25	1,36E-10	1,02E-10	5,576E-11	1,959E-11	1,54E-11	3,26E-11	6,02E-11
100	2,08E-10	1,51E-10	1,340E-10	8,296E-11	6,40E-11	1,03E-10	1,24E-10
500	7,65E-10	7,22E-10	7,918E-10	6,249E-10	5,90E-10	8,13E-10	7,18E-10
1000	1,6E-09	1,58E-09	1,789E-09	1,384E-09	1,23E-09	1,77E-09	1,56E-09
2000	3,39E-09	3,62E-09	4,050E-09	2,910E-09	2,38E-09	3,83E-09	3,37E-09
5000	8,85E-09	1,12E-08	1,130E-08	7,139E-09	5,51E-09	1,05E-08	9,08E-09
10000	1,79E-08	2,62E-08	2,313E-08	1,320E-08	1,08E-08	2,28E-08	1,9E-08
20000	3,68E-08	6,04E-08	4,4702E-08	2,351E-08	2,18E-08	4,9E-08	3,94E-08
50000	1,01E-07	1,76E-07	1,009E-07	4,986E-08	5,78E-08	1,32E-07	1,03E-07
100000	2,21E-07	3,77E-07	1,818E-07	8,810E-08	1,19E-07	2,71E-07	2,1E-07
200000	4,56E-07	7,32E-07	3,083E-07	1,472E-07	2,29E-07	5,1E-07	3,97E-07
250000	5,75E-07	9,01E-07	3,656E-07	1,744E-07	2,82E-07	6,24E-07	4,87E-07
300000	6,94E-07	1,06E-06	4,213E-07	2,009E-07	3,35E-07	7,34E-07	5,75E-07
350000	8,12E-07	1,22E-06	4,753E-07	2,265E-07	3,88E-07	8,43E-07	6,62E-07
400000	9,33E-07	1,38E-06	5,303E-07	2,551E-07	4,39E-07	9,49E-07	7,48E-07
450000	1,06E-06	1,54E-06	5,876E-07	2,822E-07	4,92E-07	1,06E-06	8,36E-07
500000	1,19E-06	1,7E-06	6,475E-07	3,134E-07	5,52E-07	1,17E-06	9,29E-07
550000	1,28E-06	1,82E-06	6,806E-07	3,302E-07	5,87E-07	1,24E-06	9,89E-07
600000	1,36E-06	1,92E-06	7,112E-07	3,381E-07	6,16E-07	1,31E-06	1,04E-06
650000	1,45E-06	2,03E-06	7,429E-07	3,475E-07	6,47E-07	1,38E-06	1,1E-06
700000	1,58E-06	2,2E-06	8,038E-07	3,767E-07	7,02E-07	1,49E-06	1,19E-06
750000	1,72E-06	2,35E-06	8,712E-07	4,200E-07	7,72E-07	1,62E-06	1,29E-06
800000	1,79E-06	2,44E-06	9,058E-07	4,405E-07	8,09E-07	1,69E-06	1,35E-06
850000	1,87E-06	2,56E-06	9,403E-07	4,511E-07	8,49E-07	1,76E-06	1,4E-06
900000	2,05E-06	2,77E-06	1,013E-06	4,905E-07	9,17E-07	1,91E-06	1,52E-06
950000	2,24E-06	3E-06	1,113E-06	5,616E-07	1,02E-06	2,12E-06	1,67E-06
1000000	2,45E-06	3,23E-06	1,209E-06	6,015E-07	1,10E-06	2,24E-06	1,81E-06

Приложение Г

Таблица Г.1 – Частотная зависимость относительной диэлектрической проницаемости углей месторождения Богатырь

f, Hz	Относительная диэлектрическая проницаемость образцов						Среднее
	1	2	3	4	5	6	
25	26,565	69,46	26,91538	54,153	33,43538	39,975	41,7506
100	24,969	55,91908	24,613	46,94333	31,0026	33,21825	36,1109
500	23,68975	45,71525	22,69571	41,70623	28,0686	29,08815	31,8273
1000	23,1315	42,8387	21,88683	39,56535	26,78905	27,7095	30,3202
2000	22,5715	40,35664	21,07386	37,49378	25,48098	26,3445	28,8869
5000	21,7315	37,10825	19,97565	34,61535	23,59018	24,50175	26,9204
10000	20,993	34,29588	19,10299	32,10818	21,97444	23,07435	25,2581
20000	20,18625	31,07014	18,1582	29,31885	20,18551	21,6333	23,4254
50000	18,89825	26,07204	16,66268	25,1262	17,49194	19,5039	20,6258
100000	17,619	21,88556	15,28431	21,67407	15,28533	17,61981	18,228
200000	16,67225	19,42049	14,32363	19,5921	13,96095	16,38975	16,7265
250000	16,226	18,34461	13,86519	18,711	13,37211	15,78525	16,0507
300000	15,83225	17,48958	13,48214	17,9883	12,90145	15,3075	15,5002
350000	15,498	16,80441	13,16633	17,39925	12,52248	14,89995	15,0484
400000	15,162	16,24005	12,89941	16,87455	12,20666	14,54505	14,6546
450000	14,91525	15,78705	12,68344	16,47608	11,95605	14,274	14,3486
500000	14,7595	15,43786	12,54693	16,1964	11,78898	14,08875	14,1364
550000	14,5495	15,04526	12,3554	15,86228	11,58115	13,84305	13,8728
600000	14,30275	14,67531	12,16184	15,5133	11,36721	13,5954	13,6026
650000	14,02625	14,29215	11,92753	15,1668	11,14309	13,31655	13,3121
700000	13,78825	13,97316	11,73396	14,85743	10,93526	13,07865	13,0611
750000	13,68325	13,77875	11,64635	14,70645	10,83746	12,9675	12,9366
800000	13,6395	13,62964	11,60764	14,5926	10,79264	12,9051	12,8612
850000	13,4785	13,39748	11,4915	14,3946	10,67854	12,75495	12,6993
900000	13,2895	13,1219	11,34888	14,1471	10,52776	12,56385	12,4998
950000	13,195	12,95014	11,2633	13,99613	10,4483	12,4449	12,383
1000000	13,16525	12,91428	11,25311	13,97633	10,43608	12,4449	12,365

Таблица Г.2 – Частотная зависимость относительной диэлектрической проницаемости углей месторождения Сарыадыр (пласт Надежный)

f, Hz	Относительная диэлектрическая проницаемость образцов						Среднее
	1	2	3	4	5	6	
25	31,40225	25,34469	25,0425	22,33613	23,429063	18,82113	24,395958
100	28,44229	22,8125	23,2816	21,07406	21,470813	17,55675	22,439665
500	24,88929	20,20047	21,0755	19,21193	18,943738	15,88958	20,035075
1000	23,30167	19,12805	20,0201	18,27371	17,771352	15,12445	18,936555
2000	21,6733	18,05838	18,917	17,2593	16,570525	14,33259	17,801853
5000	19,48664	16,70103	17,3489	15,81626	14,952638	13,28497	16,265071
10000	17,78277	15,6601	16,0739	14,63254	13,738523	12,48263	15,061744
20000	16,08516	14,65019	14,7552	13,44692	12,556113	11,70811	13,866949
50000	13,80445	13,29969	12,9943	11,91339	11,047794	10,69119	12,291799
100000	12,08177	12,26993	11,7022	10,8123	9,9437138	9,915951	11,120978
200000	11,12664	11,68456	11,0326	10,22509	9,3413188	9,49365	10,483978
250000	10,70864	11,41081	10,6888	9,941719	9,0685625	9,2769	10,182568
300000	10,37946	11,19409	10,4582	9,73455	8,849425	9,123369	9,9565208
350000	10,11821	11,01844	10,2933	9,5631	8,6769125	9,024025	9,782325
400000	9,914438	10,88841	10,1124	9,413081	8,5463625	8,899394	9,6290135
450000	9,747238	10,78119	9,99514	9,313069	8,4461188	8,832563	9,5192188
500000	9,650575	10,74013	9,94545	9,267825	8,3925	8,8145	9,4684958
550000	9,5304	10,66256	9,858	9,191625	8,3155688	8,762119	9,3867125
600000	9,399775	10,57359	9,75465	9,096375	8,2223188	8,693481	9,2900323
650000	9,256088	10,44813	9,61354	8,979694	8,1057563	8,585106	9,1647177
700000	9,107175	10,32266	9,49628	8,865394	8,0078438	8,492988	9,0487219
750000	9,052313	10,28616	9,46845	8,836819	7,9752063	8,489375	9,0180531
800000	9,0497	10,33634	9,49826	8,870156	7,9961875	8,527306	9,046326
850000	9,013125	10,31809	9,47243	8,851106	7,972875	8,521888	9,0249188
900000	8,926913	10,25422	9,39491	8,791575	7,9099313	8,471313	8,9581438
950000	8,877275	10,22228	9,35715	8,774906	7,879625	8,464088	8,9292208
1000000	8,8825	10,25878	9,39094	8,786813	7,9029375	8,492988	8,9524927

Таблица Г.3 – Частотная зависимость относительной диэлектрической проницаемости углей месторождения Сарыадыр (пласт Пятиметровый)

f, Hz	Относительная диэлектрическая проницаемость образцов						Среднее
	1	2	3	4	5	6	
25	106,59	106,2205	58,08056	61,965	41,366	32,2335	67,74259
100	77,8052	71,58848	51,85614	56,47613	38,7649	29,8737	54,39409
500	59,1646	50,23538	47,07269	52,19213	36,038	27,6443	45,39118
1000	54,1618	45,5402	45,20767	50,82278	34,7356	26,8085	42,87943
2000	50,3932	42,48003	43,38486	49,46681	33,3925	26,0476	40,86083
5000	46,6928	39,71688	41,11689	47,60021	31,6147	25,075	38,63607
10000	44,3146	37,97833	39,26914	45,98224	30,2105	24,2499	37,00079
20000	42,0728	36,42508	37,24678	44,16536	28,8064	23,3736	35,34832
50000	38,6958	33,99983	33,88513	40,94089	26,5753	21,9372	32,67234
100000	35,244	31,60183	31,36197	38,42404	24,3183	20,4495	30,23326
200000	32,6194	29,6807	28,00608	34,66406	22,5922	19,3529	27,81923
250000	31,3082	28,66973	26,85099	33,12259	21,7505	18,7031	26,73418
300000	30,1554	27,74595	25,85324	31,88903	21,0142	18,203	25,81012
350000	29,1522	26,91755	25,00131	30,8448	20,3741	17,784	25,01232
400000	28,1974	26,1164	24,1916	29,78145	19,7562	17,3394	24,2304
450000	27,4604	25,49238	23,60638	28,98968	19,3048	17,0166	23,64504
500000	26,873	24,99098	23,14204	28,33369	18,9477	16,7751	23,17708
550000	26,1602	24,38603	22,57218	27,51705	18,5019	16,4566	22,59899
600000	25,421	23,75655	21,96201	26,69659	18,0412	16,121	21,99973
650000	24,6928	23,09983	21,36336	25,90673	17,5676	15,7705	21,40013
700000	24,1296	22,5739	20,91821	25,31768	17,205	15,4584	20,9338
750000	23,76	22,23873	20,64383	24,9237	16,9849	15,3088	20,64331
800000	23,364	21,8981	20,34834	24,41498	16,7795	15,172	20,32948
850000	22,8008	21,4185	19,87441	23,75325	16,4428	14,9326	19,87039
900000	22,231	20,91165	19,45613	23,14699	16,0913	14,6611	19,41636
950000	21,8812	20,65005	19,19709	22,80656	15,8804	14,4965	19,15197
1000000	21,7734	20,4593	19,13378	22,67078	15,8323	14,4602	19,05496

Таблица Г.4 –Частотная зависимость относительной диэлектрической проницаемости углей месторождения Майкубен

f, Hz	Относительная диэлектрическая проницаемость образцов						Среднее
	1	2	3	4	5	6	
25	39,5455	46,6015	31,279	19,966375	23,02425	39,24375	33,27673
100	35,75775	44,81625	29,5957	19,006488	22,43498	38,25868	31,64497
500	33,6658	42,9237	27,31875	17,172513	20,66918	35,74708	29,58284
1000	32,62504	41,91175	26,0493	16,103945	19,55563	34,37298	28,43644
2000	31,34103	40,70925	24,5148	14,9149	18,52673	32,90105	27,15129
5000	29,46626	38,7353	22,1123	13,2847	17,3745	30,84218	25,30254
10000	28,02935	36,84645	20,0942	12,124434	16,55174	29,08133	23,78792
20000	26,58723	34,5284	18,0978	11,102163	15,70793	27,1271	22,19177
50000	24,48311	30,6397	15,5868	9,927775	14,46863	24,1059	19,86865
100000	22,52321	27,0655	13,857155	9,131265	13,37715	21,52423	17,91309
200000	21,14711	24,7086	12,9549	8,7140625	12,6846	19,8835	16,68213
250000	20,45906	23,6282	12,5519	8,54425	12,34643	19,18963	16,11991
300000	19,877	22,74575	12,2233	8,4084	12,08925	18,61178	15,65925
350000	19,39224	22,03165	11,97065	8,294	11,87258	18,13403	15,28252
400000	18,98219	21,4304	11,7614	8,1778125	11,67615	17,68813	14,95268
450000	18,65033	20,9531	11,60795	8,1098875	11,5344	17,37418	14,70497
500000	18,43314	20,61455	11,52735	8,0955875	11,4696	17,17398	14,55237
550000	18,12908	20,18165	11,3956	8,0491125	11,35013	16,89415	14,33329
600000	17,81459	19,75245	11,2468	7,9811875	11,22053	16,60978	14,10422
650000	17,44971	19,2844	11,05615	7,8882375	11,04435	16,28218	13,83417
700000	17,14913	18,92365	10,9089	7,80065	10,89855	16,01828	13,61653
750000	17,03793	18,7627	10,87945	7,7917125	10,85805	15,92045	13,54171
800000	16,94236	18,60175	10,88255	7,8274625	10,8783	15,8522	13,49744
850000	16,72691	18,29095	10,80505	7,818525	10,81755	15,6884	13,3579
900000	16,47498	17,98015	10,6981	7,7774125	10,72035	15,47	13,18683
950000	16,32208	17,80625	10,64695	7,7666875	10,66365	15,36763	13,09554
1000000	16,32729	17,7933	10,67485	7,7845625	10,69808	15,3699	13,108

Приложение Д

Таблица Д.1 –Частотная зависимость тангенса угла потерь углей месторождения Богатырь

f, Hz	Тангенс угла потерь образцов						Среднее
	1	2	3	4	5	6	
25	0,2019	0,5424	0,2039	0,8722	0,2136	0,4769	0,41848
100	0,0864	0,3192	0,1135	0,3451	0,1199	0,2485	0,20543
500	0,0623	0,2028	0,0897	0,1748	0,1122	0,1475	0,13155
1000	0,0614	0,1748	0,0897	0,1546	0,1169	0,1334	0,1218
2000	0,064	0,1635	0,0923	0,1488	0,1261	0,1298	0,12075
5000	0,074	0,1739	0,0993	0,1623	0,147	0,1343	0,1318
10000	0,0838	0,1988	0,109	0,1845	0,1697	0,1425	0,14805
20000	0,0961	0,2341	0,1225	0,2121	0,1955	0,1542	0,16908
50000	0,1223	0,2942	0,1515	0,2573	0,2365	0,1807	0,20708
100000	0,1502	0,3468	0,1787	0,2949	0,2677	0,2104	0,24145
200000	0,1717	0,3533	0,1938	0,299	0,2684	0,2224	0,25143
250000	0,1808	0,3598	0,2004	0,3024	0,2709	0,2296	0,25732
300000	0,1884	0,3644	0,2059	0,3053	0,2725	0,2352	0,26195
350000	0,1956	0,3687	0,211	0,3085	0,2745	0,2399	0,26637
400000	0,203	0,3711	0,2141	0,312	0,275	0,2453	0,27008
450000	0,21	0,3738	0,2187	0,3147	0,2763	0,2496	0,27385
500000	0,2165	0,3766	0,2224	0,3168	0,2772	0,2537	0,2772
550000	0,2146	0,3732	0,2211	0,3111	0,2723	0,2516	0,27398
600000	0,2156	0,369	0,2182	0,3087	0,2676	0,249	0,27135
650000	0,2171	0,3691	0,2172	0,3073	0,2648	0,249	0,27075
700000	0,2253	0,3731	0,2221	0,3122	0,2682	0,2547	0,27593
750000	0,2319	0,3752	0,2266	0,3142	0,2717	0,2595	0,27985
800000	0,2302	0,3708	0,2255	0,3102	0,2662	0,2561	0,2765
850000	0,2308	0,3686	0,2248	0,3085	0,2633	0,2573	0,27555
900000	0,2414	0,3824	0,2322	0,3195	0,2719	0,2661	0,28558
950000	0,2522	0,3979	0,2443	0,3339	0,2819	0,2803	0,29842
1000000	0,2636	0,3997	0,2495	0,3355	0,2859	0,2836	0,30297

Таблица Д.2 – Частотная зависимость тангенса угла потерь углей месторождения Сарыадыр (пласт Надежный)

f, Hz	Тангенс угла потерь образцов						Среднее
	1	2	3	4	5	6	
25	0,1225	0,161	0,0954	0,0876	0,1171	0,1071	0,11511667
100	0,1195	0,1243	0,0869	0,0799	0,1099	0,0896	0,10168333
500	0,1436	0,1258	0,1108	0,106	0,137	0,1092	0,12206667
1000	0,1552	0,1282	0,1222	0,1194	0,1494	0,1169	0,13188333
2000	0,169	0,1321	0,1351	0,1352	0,162	0,1237	0,14285
5000	0,1902	0,1381	0,1558	0,1564	0,1775	0,1325	0,15841667
10000	0,2068	0,1441	0,172	0,1709	0,1883	0,1378	0,16998333
20000	0,2234	0,1483	0,1858	0,1814	0,1961	0,1413	0,17938333
50000	0,2484	0,1551	0,199	0,1901	0,206	0,1472	0,19096667
100000	0,2643	0,1609	0,2053	0,1941	0,2107	0,15	0,19755
200000	0,2485	0,15	0,1858	0,1761	0,1943	0,1377	0,18206667
250000	0,2448	0,1482	0,1824	0,1737	0,1907	0,135	0,17913333
300000	0,242	0,1468	0,1799	0,17	0,1882	0,1342	0,17685
350000	0,2396	0,1461	0,1766	0,1679	0,1864	0,1321	0,17478333
400000	0,2359	0,1447	0,1747	0,1675	0,1837	0,1313	0,17296667
450000	0,2345	0,1445	0,1745	0,1665	0,184	0,1309	0,17248333
500000	0,2336	0,1456	0,1733	0,1663	0,1831	0,1317	0,17226667
550000	0,2264	0,1396	0,1675	0,1605	0,1764	0,1261	0,16608333
600000	0,2194	0,1357	0,1605	0,1545	0,1707	0,1204	0,1602
650000	0,2127	0,1308	0,1553	0,15	0,1653	0,1152	0,15488333
700000	0,213	0,1326	0,157	0,1512	0,1673	0,1175	0,15643333
750000	0,2157	0,1386	0,1619	0,1555	0,1714	0,122	0,16085
800000	0,2126	0,1353	0,1574	0,1523	0,168	0,12	0,1576
850000	0,2074	0,1314	0,1293	0,1478	0,1626	0,1156	0,14901667
900000	0,2106	0,1356	0,1571	0,1525	0,1684	0,1191	0,15721667
950000	0,2184	0,1468	0,1667	0,1575	0,1777	0,1245	0,16526667
1000000	0,2221	0,1492	0,17	0,1645	0,1799	0,1318	0,16958333

Таблица Д.3 – Частотная зависимость тангенса угла потерь углей месторождения Сарыадыр (пласт Пятиметровый)

f, Hz	Тангенс угла потерь образцов						Среднее
	1	2	3	4	5	6	
25	0,5305	0,7122	0,2361	0,1531	0,1163	0,1263	0,31241667
100	0,3787	0,504	0,1291	0,0979	0,0759	0,0844	0,21166667
500	0,2606	0,3267	0,1032	0,0744	0,0828	0,0759	0,15393333
1000	0,2143	0,2478	0,0991	0,0693	0,0872	0,0718	0,13158333
2000	0,1775	0,1872	0,0988	0,0693	0,0922	0,0709	0,11598333
5000	0,1461	0,1381	0,1046	0,0781	0,0996	0,0753	0,10696667
10000	0,1362	0,1216	0,1159	0,0902	0,1081	0,0831	0,10918333
20000	0,1386	0,1185	0,1343	0,1076	0,1207	0,0946	0,11905
50000	0,1674	0,1399	0,1769	0,1502	0,1545	0,123	0,15198333
100000	0,2116	0,1775	0,2119	0,191	0,1961	0,1571	0,19086667
200000	0,2523	0,2176	0,2585	0,2501	0,2319	0,1875	0,23298333
250000	0,2708	0,2363	0,2732	0,2722	0,2472	0,2019	0,25026667
300000	0,2874	0,254	0,2858	0,2914	0,2611	0,2149	0,26576667
350000	0,3028	0,2696	0,2977	0,3074	0,2735	0,2252	0,27936667
400000	0,3179	0,286	0,3098	0,3239	0,2859	0,2365	0,29333333
450000	0,3314	0,3006	0,3199	0,3384	0,2958	0,2461	0,30536667
500000	0,3431	0,3135	0,3288	0,3511	0,3055	0,2554	0,31623333
550000	0,347	0,3192	0,3294	0,3578	0,3081	0,2588	0,32005
600000	0,3542	0,3266	0,3346	0,3651	0,3116	0,2607	0,32546667
650000	0,3652	0,3362	0,3417	0,3783	0,3183	0,2651	0,33413333
700000	0,3784	0,3494	0,3525	0,3908	0,3282	0,2753	0,34576667
750000	0,3847	0,3588	0,3574	0,3951	0,3343	0,2819	0,35203333
800000	0,3854	0,3616	0,3561	0,3975	0,3331	0,2824	0,35268333
850000	0,3941	0,3705	0,3656	0,411	0,3382	0,2858	0,36086667
900000	0,4175	0,3918	0,3835	0,4363	0,3575	0,3021	0,38145
950000	0,4418	0,4084	0,4043	0,4593	0,3771	0,3216	0,40208333
1000000	0,4473	0,4226	0,4073	0,4633	0,3811	0,3263	0,40798333

Таблица Д.4 – Частотная зависимость тангенса угла потерь углей месторождения Майкубен

f, Hz	Тангенс угла потерь образцов						Среднее
	1	2	3	4	5	6	
25	0,4717	0,1769	0,1445	0,0646	0,0521	0,0723	0,163683
100	0,1086	0,0708	0,0855	0,0756	0,0507	0,051	0,0737
500	0,0846	0,0626	0,1049	0,1265	0,1018	0,082	0,093733
1000	0,0891	0,0679	0,1237	0,1502	0,1122	0,0925	0,105933
2000	0,098	0,079	0,1486	0,1709	0,1135	0,1033	0,118883
5000	0,108	0,1022	0,1835	0,1889	0,1129	0,1223	0,1363
10000	0,1158	0,1265	0,2068	0,1921	0,1165	0,1405	0,1497
20000	0,1249	0,1556	0,222	0,187	0,1237	0,162	0,162533
50000	0,1476	0,205	0,2335	0,1783	0,1428	0,1968	0,184
100000	0,1766	0,2488	0,2356	0,1708	0,1598	0,227	0,2031
200000	0,1948	0,2655	0,2136	0,1497	0,1615	0,2314	0,20275
250000	0,2031	0,2733	0,2099	0,1448	0,1641	0,2338	0,204833
300000	0,21	0,2793	0,2068	0,1415	0,1655	0,2361	0,206533
350000	0,2167	0,2851	0,2052	0,1385	0,167	0,2383	0,208467
400000	0,2218	0,2891	0,2028	0,1377	0,1688	0,2414	0,210267
450000	0,2269	0,2933	0,2024	0,138	0,1716	0,2433	0,212583
500000	0,232	0,2964	0,2019	0,1373	0,1733	0,2462	0,214517
550000	0,2309	0,294	0,1958	0,1318	0,17	0,2423	0,2108
600000	0,2288	0,2909	0,1894	0,126	0,1653	0,238	0,2064
650000	0,2308	0,2921	0,1863	0,1212	0,1618	0,2361	0,204717
700000	0,2374	0,2983	0,1894	0,1225	0,166	0,2407	0,20905
750000	0,2414	0,3	0,1924	0,1276	0,171	0,2438	0,2127
800000	0,2389	0,2956	0,1868	0,125	0,1678	0,24	0,209017
850000	0,2392	0,2977	0,1846	0,1224	0,1669	0,2373	0,208017
900000	0,2486	0,3076	0,1892	0,1247	0,1713	0,2473	0,214783
950000	0,2653	0,3225	0,2011	0,1309	0,1835	0,2587	0,227
1000000	0,2694	0,3265	0,204	0,1375	0,1863	0,2635	0,2312

Приложение Е

УТВЕРЖДАЮ

Технический директор-главный инженер

ТОО «Богатырь Комир»

С.Г.Усик

«30» 10 2020г.



Акт внедрения

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

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

Результаты испытаний:

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

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

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

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

С помощью переносного газоанализатора были определен состав синтез-газа: CO - 22,29%; CO_2 - 4,49%; CH_4 - 5,12%; H_2 - 73,20%; N_2 - 10,11%

Полевые испытания опытной установки и технологии внутрислоистой конверсии прошли успешно.

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

Заместитель технического директора



Г.Е. Иргебаев

Главный инженер разреза «Богатырь»



Е.М.Жунусов

Главный геолог разреза «Богатырь»



М.А.Амирханов