

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

На правах рукописи

Севагина Полина Сергеевна

ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АКТИВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СПОСОБОВ ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ УГЛЕЙ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЦИКЛИЧЕСКОГО ЗАМОРАЖИВАНИЯ-ОТТАИВАНИЯ

2.8.3 Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук доцент кафедры ФизГео
Николенко Петр Владимирович

Москва, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ УГЛЕЙ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЦИКЛИЧЕСКОГО ЗАМОРАЖИВАНИЯ-ОТТАИВАНИЯ НА СТРУКТУРУ, СВОЙСТВА И СОСТОЯНИЕ ИСКОПАЕМЫХ УГЛЕЙ.....	9
1.1 Техничко-экономические предпосылки к изучению углей под влиянием циклического замораживания-оттаивания	9
1.2 Особенности низкотемпературного воздействия на структуру, свойства и состояние угля.....	15
1.3 Изменение механических и потребительские свойства угольной продукции под влиянием циклического замораживания-оттаивания.....	19
1.4 Общая характеристика методов оценки степени нарушенности угля при ЦЗО	27
1.5 Применение акустических методов для оценки и прогноза степени поврежденности углей под влиянием циклического замораживания-оттаивания	31
1.6 Цель и задачи исследования.....	33
2 МЕТОДИЧЕСКОЕ И АППАРАТУРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ АКТИВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАРУШЕННОСТИ ОБРАЗЦОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЦЗО	35
2.1 Сведения об образцах, используемых при оценке нарушенности под влиянием ЦЗО.....	35
2.2 Использование поперечных колебаний при оценке степени нарушенности углей под влиянием ЦЗО	38
2.3 Особенности обеспечения контактных условий при оценке нарушенности под влиянием ЦЗО при использовании поперечных упругих колебаний	43

2.4	Использование продольных колебаний при оценке степени нарушенности углей под влиянием ЦЗО	49
2.5	Выводы	54
3	ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦЗО НА СВОЙСТВА УГЛЕЙ РАЗНОГО ВИДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ АКТИВНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПРОЗВУЧИВАНИЯ	55
3.1	Исследование влияния количества циклов ЦЗО на степень нарушенности углей с использованием поперечных волн	55
3.1.1	Влияние циклического замораживания-оттаивания на амплитуды и скорости поперечных волн	55
3.1.2	Спектральный анализ акустических сигналов	59
3.1.3	Реверберационный метод анализа акустического сигнала	67
3.2	Исследование влияние влаги на изменение нарушенности углей при их ЦЗО с использованием продольных волн.	71
3.2.1	Спектральный анализ акустических сигналов	71
3.3	Выводы	80
4	СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ УГЛЕЙ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЦЗО ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ И ХРАНЕНИИ УГЛЯ.....	83
4.1	Способ оценки влияния ЦЗО при транспортировке и хранении угля на структуру, свойства и состояние ископаемых углей.....	83
4.2	Способ оценки влияния влажности углей на структуру, свойства и состояние в процессе транспортировки и хранения.....	90
4.3	Рекомендации на основании результатов оценки поврежденности углей под влиянием ЦЗО.....	92
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	95
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	97
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	98
	ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	113

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Наибольшее количество действующих месторождений угля расположены в северных регионах страны, преимущественно на территориях Арктики, Крайнего Севера. Данные регионы характеризуются циклическими изменениями температуры, охватывающими как положительные, так и отрицательные значения.

Такие климатические условия приводят к тому, что при хранении и транспортировании с месторождений добытые угли подвергаются циклическому замораживанию-оттаиванию (ЦЗО), что приводит к изменению как механических, так и потребительских свойств продукции.

На данный момент для оценки устойчивости к ЦЗО применяется ограниченный ряд методов, основанных преимущественно на исследовании поверхности угля (наноиндентирование, микроскопия образцов угля).

Наряду с исследованиями поверхности используются пассивные акустические измерения в ультразвуковом диапазоне частот, в частности, измерение акустической эмиссии одноосно нагружаемых углей после термического нагружения. Главным недостатком данного способа оценки является отсутствие многократных измерений на одних и тех же образцах вследствие разрушения образца в процессе испытаний.

Перспективными способами оценки нарушенности углей по всему объему исследуемого образца вследствие ЦЗО являются активные ультразвуковые методы. Изменение параметров ультразвукового импульса, проходящего через образец, несет в себе информацию о степени и характере возникающих нарушений. Однако высокая степень исходной дефектности, гетерогенность и природная анизотропия делают малоэффективными попытки применения информативных параметров ультразвуковых сигналов. Расширение возможностей ультразвуковых (УЗ) методов лежит в использовании способов прозвучивания с использованием поперечной волны с управляемой поляризацией, а также в применении более сложных алгоритмов обработки сигналов, таких как спектральная обработка зарегистрированных

продольных волн. Поэтому решение задач теоретического, методического и аппаратного характера, направленных на повышение эффективности и совершенствование УЗ измерений в образцах угля, подвергшихся ЦЗО за счет использования различных параметров ультразвуковых сигналов, позволяющих получить детальную информацию о развитии и структуре нарушений в образцах угля весьма актуально.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-05-70002).

Цель исследования. Установление закономерностей влияния циклического замораживания-оттаивания на параметры ультразвукового сигнала в образцах угля, обосновании и разработке на этой основе способов оценки нарушенности углей различных видов.

Идея работы. Использование динамических и спектральных характеристик ультразвуковых импульсов для анализа дефектообразования в образцах угля различных видов под воздействием циклического замораживания-оттаивания.

Задачи исследования:

1. Обоснование принципов и выбор оптимальных информативных параметров экспериментального исследования влияния ЦЗО на параметры ультразвуковых сигналов в образцах угля различных видов.
2. Разработка специализированного лабораторного оборудования для проведения ультразвуковых исследований на образцах угля, подвергаемых ЦЗО.
3. Экспериментальное исследование влияния количества циклов замораживания-оттаивания на кинематические, динамические и спектральные параметры поперечных волн с управляемым вектором поляризации.
4. Установление закономерностей влияния ЦЗО на спектральные параметры продольных волн в образцах угля различных видов при различных уровнях содержания влаги.
5. Обоснование и разработка комплексных ультразвуковых способов оценки степени поврежденности углей, подвергнутых ЦЗО.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Оптимальные контактные условия на границе «преобразователь-образец» при ультразвуковом прозвучивании углей, подвергаемых циклическим низкотемпературным воздействиям, достигаются использованием специализированных протекторов с нанесенным на них абразивом, размер зерна которого составляет: 35-75 мкм для антрацита и каменного угля, 75-250 мкм для бурого угля.

2. Рост степени нарушенности углей при циклическом низкотемпературном воздействии проявляется в виде снижения амплитуд первого вступления поперечных волн с изменяемым вектором поляризации. Наибольшее снижение указанных амплитуд в образцах антрацита и каменного угля наблюдается после 6 и 3 циклов соответственно. При этом для всех исследованных видов углей с ростом количества циклов замораживания-оттаивания характерно снижение коэффициента анизотропии.

3. При ультразвуковом прозвучивании продольными волнами сухих образцов антрацита и каменного угля, при воздействии циклического замораживания-оттаивания, характерно циклическое обратимое изменение спектральных характеристик сигналов. Рост содержания влаги приводит к необратимому увеличению ширины спектра зарегистрированного сигнала, снижению интервала корреляции, что свидетельствует о росте нарушенности в образцах.

Научная новизна работы состоит в:

- установлении закономерностей изменения информативных параметров активных ультразвуковых методов контроля под влиянием циклического замораживания-оттаивания;
- обосновании возможных и выборе наиболее эффективных способов оценки степени выветривания под воздействием циклического замораживания-оттаивания на образцы угля различных видов;
- разработке специализированного лабораторного оборудования для проведения ультразвуковых исследований воздействия циклического замораживания-оттаивания на различные виды углей;

- в создании экспериментального базиса для разработки ранее не использовавшихся подходов к разрушению углей под воздействием циклического замораживания-оттаивания при исследовании способов прогнозирования поврежденности углей в процессе их транспортировки.

Методология и методы исследования включают: анализ и обобщение научно-технической информации; моделирование естественного выветривания угля под воздействием ЦЗО, теоретический анализ потенциальных возможностей и информативных параметров ультразвукового прозвучивания; лабораторный эксперимент на образцах угля различных видов, подвергнутых циклическому замораживанию-оттаиванию, статистическую обработку полученных данных.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

- удовлетворительным совпадением установленных по результатам лабораторных экспериментов закономерностей изменения параметров ультразвуковых сигналов при воздействии циклического замораживания-оттаивания на образцы угля с результатами исследований в данной области отечественных и зарубежных ученых, представительным объемом экспериментальных данных, лежащих в основе указанных закономерностей;

- использованием при проведении исследований апробированных, хорошо зарекомендовавших себя методов испытаний и обработки экспериментальных данных, а также средств измерений с высокими метрологическими характеристиками;

- удовлетворительной сходимостью данных контроля исследуемых образцов при применении различных методов ультразвуковых исследований.

Практическая значимость и реализация результатов.

В рамках диссертационной работы разработана «Методика оценки склонности углей к дезинтеграции после воздействия циклического замораживания-оттаивания». Ее применение позволит оперативно оценивать качество сырья и вносить коррективы в условия хранения и транспортировки угольной продукции. Методика была использована в ФГБУН ИПКОН РАН для практического использования при проведении научно-исследовательских работ по теме FMMS-2021-0004 «Развитие

теории многофазных гео- и газодинамических процессов в техногенно изменяемом газонасыщенном углепородном массиве».

Апробация работы.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы были доложены на научных симпозиумах «Неделя горняка» (Москва, 2022 г.), 15 Международной научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых ИПКОН РАН (Москва, 2021), XVI Всероссийской молодёжной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» ИГД УрО РАН (Екатеринбург, 2022).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 научных работ, в том числе 2 работы опубликованы в журналах из списка ВАК РФ, 2 работы в изданиях, индексируемых в Scopus, и один патент на изобретение.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы из 143 источников, содержит 42 рисунка и 6 таблиц.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ УГЛЕЙ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЦИКЛИЧЕ- СКОГО ЗАМОРАЖИВАНИЯ-ОТТАИВАНИЯ НА СТРУКТУРУ, СВОЙ- СТВА И СОСТОЯНИЕ ИСКОПАЕМЫХ УГЛЕЙ

1.1 Техничко-экономические предпосылки к изучению углей под влиянием циклического замораживания-оттаивания

Интенсивность развития экономики и промышленности мира является причиной увеличения потребления полезных ископаемых, являющихся топливом для работы электростанций и промышленности. Экономический рост стран мира пропорционален приросту потребления энергетических ресурсов. Эффективные добыча, транспортировка, хранение и потребление определяют скорость функционирования и развития мировой экономики.

В мировой экономике уголь составляет значительную долю топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) [1]. Использование угля как топлива не требует трудозатратных и дорогостоящих процессов обогащения, угольную продукцию можно использоваться в качестве топлива непосредственно сразу после добычи. Угольная промышленность-одна из старейших отраслей мирового топливно-энергетического комплекса. Не смотря на низкую энергетическую эффективность, негативное воздействие на окружающую среду выбросов вредных веществ при горении, уголь по-прежнему является одним из наиболее используемых ТЭР.

Преимуществами угля как энергетического ресурса являются его низкая стоимость, невысокие требования к транспортировке, возможность хранения при сравнительно низких дополнительных затратах [2,3].

Повышение эффективности добычи, транспортировки, хранения и потребления угля в мировых масштабах позволит повысить энергетическую эффективность стран мира, приведет к укреплению экономической устойчивости потребителей угля, а также позволит улучшить экологическую обстановку [4].

Как следует из диаграммы, приведенной на рисунке 1.1.1 [5], процент использования угля в мировом производстве составляет порядка 28%.

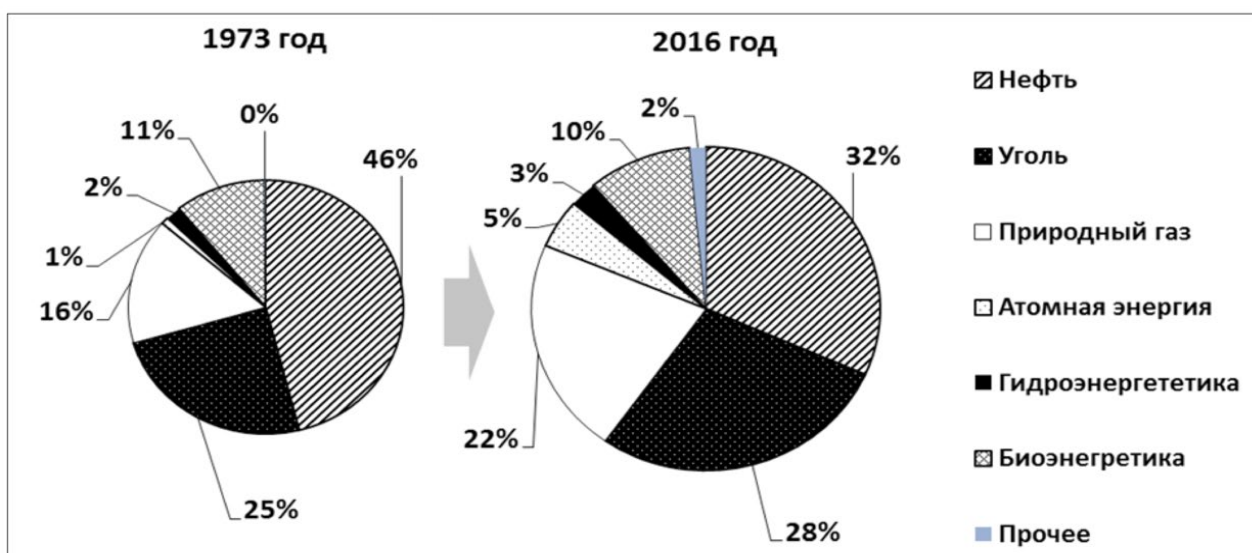


Рисунок 1.1.1 – Структура мирового производства ТЭР с 1973 по 2016 гг.

В 1990-2018 гг. динамика роста мирового производства электроэнергии (рисунок 1.1.2) составила 164%, динамика роста мирового производства потребления угля электростанции составила 163%, что также подчеркивает сохранение значительной доли угля в мировом энергетическом балансе, несмотря на сокращение потребления угля вследствие использования более экологически чистых источников энергии. При этом запасы угля, которые экономически целесообразно разрабатывать, очень велики, и в будущем уголь может сыграть главную роль в решении проблемы удовлетворения растущей потребности в энергии.

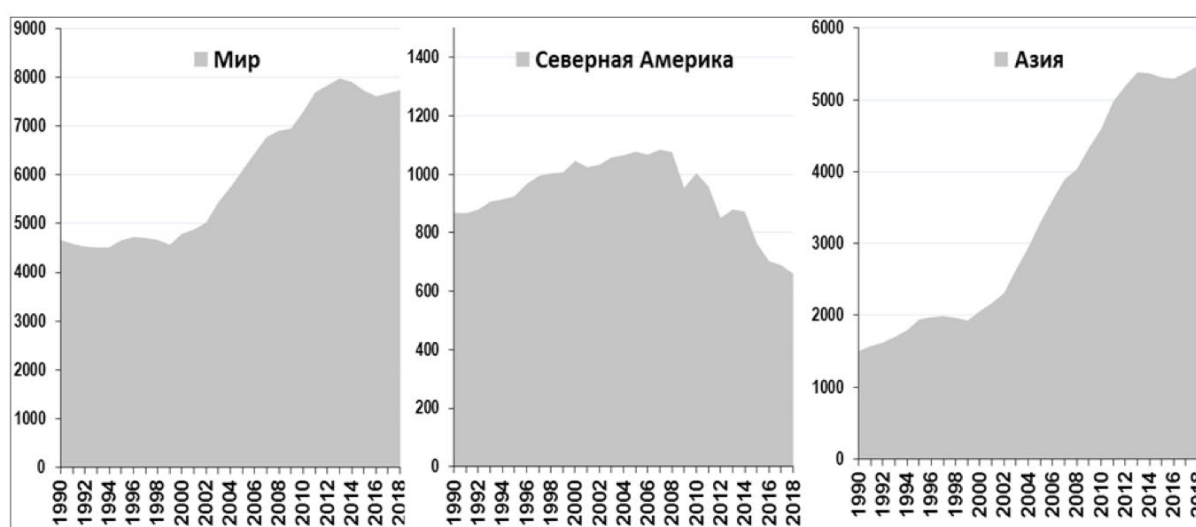


Рисунок 1.1.2 – Динамика изменения спроса на потребление угля в некоторых мировых континентах в 1990-2018 гг. (в млн т)

По объему добычи угля российская экономика занимает шестое место в мире, на ее долю приходится 4,5% мирового производства. Общее потребление угля для производства электроэнергии и тепловой энергии составляет 65% от среднемирового показателя. В то же время российская экономика является третьей страной в мире по объему экспорта, продавая более 50% собственной продукции на внешние рынки.

Большая часть отечественных угледобывающих компаний расположена в северной части страны, в основном в районах крайнего севера и Арктики.

Согласно Программе развития угольной промышленности России на период до 2035 года (Распоряжение Правительства Российской Федерации №1582-р от 13 июня 2020 года), за последние 10 лет произошло освоение угольных месторождений в Восточной Сибири, на Дальнем Востоке и в Арктической зоне Российской Федерации, осуществляются мероприятия по созданию сырьевой базы угля новых кластеров угледобычи в данных регионах [6].

Климатические условия месторождений, а также концентрация значительных запасов углей Российской Федерации в этих зонах [7] вызывают значительный интерес к различным исследованиям в данной области. География угольных месторождений показана на рисунке 1.1.3.

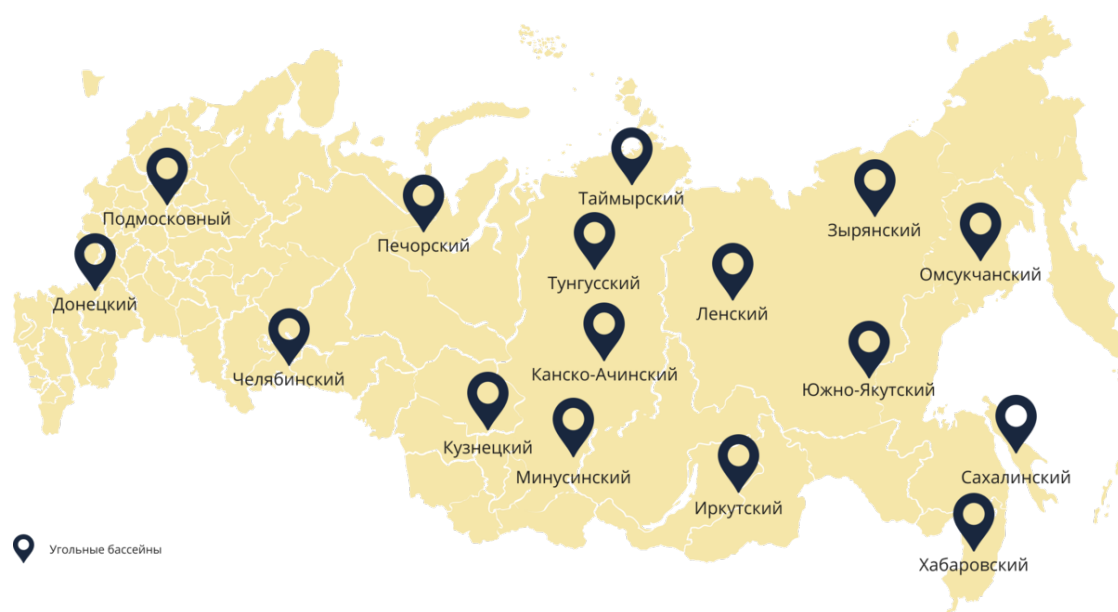


Рисунок 1.1.3 – География угольных месторождений России

Регионы Арктики, Крайнего Севера характеризуются экстремальными климатическими условиями: значительными сезонными, месячными и среднесуточными изменениями температуры, переходящими неоднократно через ноль, изменениями влажности [8]. Эти климатические условия приводят к возникновению новых рисков, характерных для добычи, транспортировки, хранения и переработки угля, связанных с изменениями механических и потребительских характеристик угольной продукции.

По мере освоения угольных месторождений по направлению на Север, проблема низкотемпературного воздействия на угольную продукцию становится всё более актуальной. На территории Российской Федерации эта проблема существует от 2-х до 12 месяцев в год [9].

При этом актуальность проблемы низкотемпературного воздействия обуславливается, в первую очередь не только регионом добычи и его температурным режимом, а расстоянием, преодолеваемым транспортным средством, груженным углем от места добычи до потребителя.

Транспортировка угля осуществляется по логистическим схемам, имеющим значительные сроки базового и промежуточного хранения.

В экстремальных климатических условиях следствием сложной цепочки добычи, транспортировки и хранения является окисление угля, изменение его гранулометрического состава и как следствие, образование мелких фракций, количественные и качественные потери [10,11,12], пыление [13]

Согласно [14, 15] Печорский, Тунгусский, Ленский, Южно-Якутский и Зырянский угольные бассейны расположены на территории Арктической зоны и Крайнего Севера. Согласно данным крупнейшей метеорологической станции в городе рядом с районом добычи угля, результаты исследований суточных и сезонных изменений температуры и влажности, приведенные в [16] приведены в таблице 1.1.1. Также стоит отметить, что в рассматриваемом районе суточное значение температуры достигает 10-15 °С, и весной и осенью наблюдается значительная разница при переходе к нулю [17].

Таблица 1.1.1 –Данные крупнейших метеорологических станций в городе рядом с угледобывающим предприятием: суточные и сезонные изменения температуры и влажности

Место наблюдения	Среднегодовой перепад температур, °С	Среднегодовой перепад влажности, %
ПГТ Зырянка (Зырянский угольный бассейн) °	-34,6...+15,2	61...80
г. Воркута (Печерский угольный бассейн)	-19,6...+13,9	69...84
г. Инта (Печерский угольный бассейн)	-20,1...+15,5	69...88
ПГТ Диксон (Таймырский угольный бассейн)	-22,5...+6,6	81...91
Г. Норильск (Тунгусский угольный бассейн)	-28,1...+15	68...82

Как упоминалось ранее, уголь подвергается циклическому низкотемпературному воздействию не только при добыче и хранении, но и при транспортировке угля. Согласно работам [18,19] транспортировка угля, добываемого в Арктике и на Крайнем Севере, осуществляется не только по железной дороге, но и по воде по Северному морскому пути.

На рисунках 1.1.4, 1.1.5 ниже приведены результаты изменения температуры и влажности при транспортировке угля по следующим маршрутам: первый - водным транспортом, по Северному морскому пути, и второй - железнодорожным транспортом.

1. Порт Диксон (Таймырский угольный бассейн) — порт Ванино (Хабаровский край).

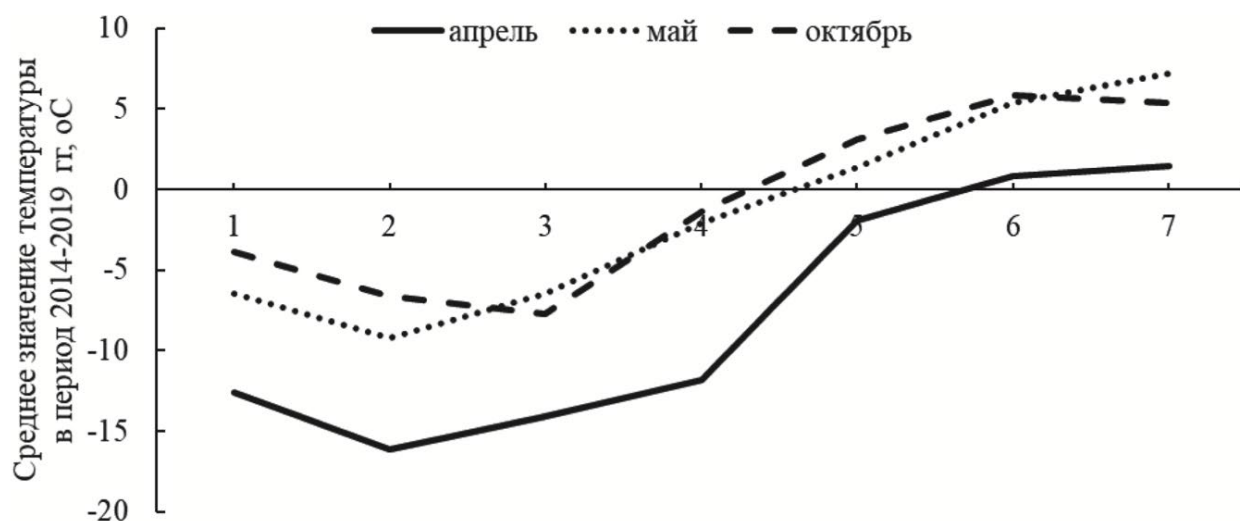


Рисунок 1.1.4 – Изменение температурных условий в ключевых точках метеонаблюдения по маршруту Диксон-Ванино в весенний и осенний периоды. 1—7 соответствуют следующим ключевым точкам маршрута: 1 — Диксон; 2 — мыс Челюскин; 3 — Тикси; 4 — Певек; 5 — Провидение; 6 — Петропавловск-Камчатский; 7 — Ванино

2. Г. Воркута (Печорский угольный бассейн) — порт Усть-Луга (Ленинградская область).

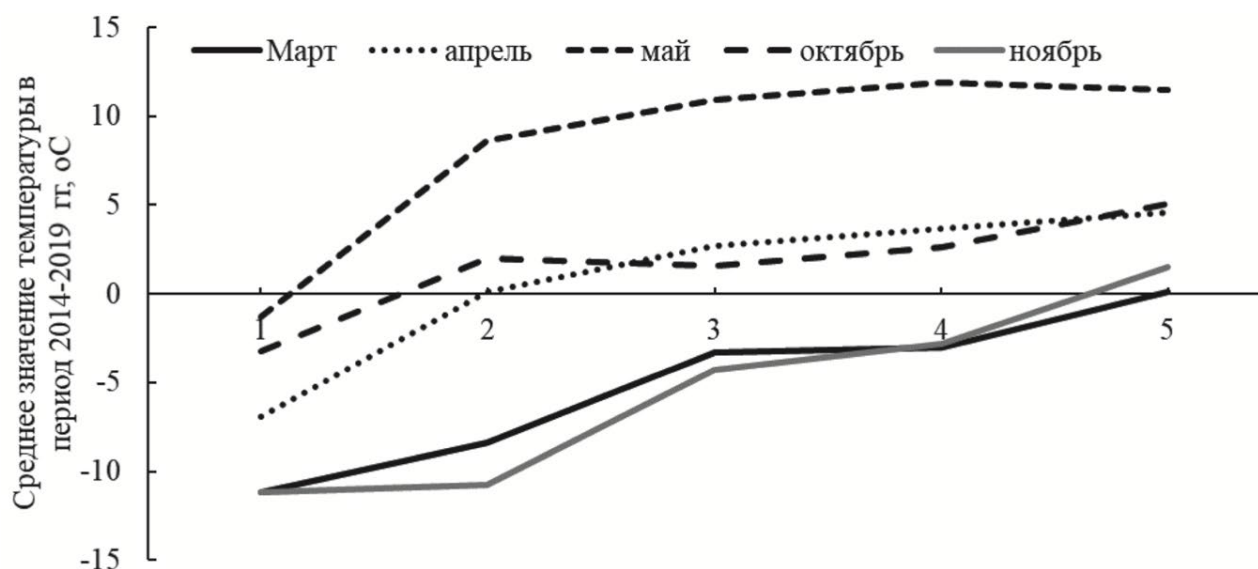


Рисунок 1.1.5 – Изменение температурных условий в ключевых точках метеонаблюдения по маршруту г. Воркута — порт Усть-Луга. 1—5 обозначают следующие ключевые точки маршрута: 1 — Воркута; 2 — Ухта; 3 — Котлас; 4 — Вологда; 5 — Усть-Луга

Анализируя приведенные выше данные, можно сделать вывод, что при транспортировке угля с Крайнего Севера и Арктики он неоднократно подвергается воздействию замерзания и оттаивания под влиянием среднесуточных колебаний температуры на всем маршруте [20]. Ряд экспертных оценок свидетельствует о высоком уровне количественных потери снижении качества угля (до 40% от первоначальной энергетической ценности) [21]. Также факт повышенных требований к крупности угля основных потребителей, зольность, рабочая влажность, удельная теплота сгорания, выход летучих веществ [22,23], обуславливает актуальность исследования факторов, в результате которых показатели качества угольной продукции изменились по сравнению с показателями, характеризующими добытое топливо.

1.2 Особенности низкотемпературного воздействия на структуру, свойства и состояние угля

Выветривание геоматериалов, в том числе и угля под воздействием низких температур, является одним из самых значимых процессов природной экзодинамики, исследователи и авторы публикаций дают различные определения данному явлению [24, 25]. Согласно исследовательским трудам П. Рича [26], выветривание – это реакция материалов, которые были устойчивы в пределах литосферы, на новые условия земной поверхности или близ контакта с атмосферой, гидросферой и биосферой.

Выветривание имеет два аспекта. С одной стороны, это связано с фрагментацией или физическим износом материнских пород. Такой процесс представляет собой полностью механическое повреждение материала. В зависимости от характера влияющих факторов характер повреждения породы во время физического выветривания различен. В некоторых случаях, процесс разрушения происходит внутри самой породы без участия внешних механических факторов. Это включает изменения объема компонентов породы, вызванные колебаниями температуры. Такое выветривание происходит под влиянием суточных и сезонных колебаний

температуры, что вызывает неравномерное нагревание и охлаждение горных пород. В то же время минеральные частицы, образующие породу, подвергаются расширению при повышении температуры и сжатию при понижении температуры. Поэтому сжимающие и растягивающие усилия в геоматериале чередуются.

Исследования влияния температуры на прочность геоматериалов проводились с середины прошлого века. Так, в [27] установлено, что фазовые переходы в поровой влаге приводят к возникновению давления, величина которого может превышать величину горного давления. Результаты многочисленных исследований [28-34] указывают на то, что горные породы различных генотипов, подвергаемые температурному воздействию, значительно теряют в прочности вплоть до полного разрушения.

В обобщении экспериментальных исследований, приведенном в [35, 36, 37], указывается, что снижение механической прочности при замораживании связано с содержанием воды, скоростью и продолжительностью замораживания, а также особенностями петрографического состава пород.

Из-за длительного воздействия температурных колебаний и различных коэффициентов расширения составляющих их минералов взаимная адгезия отдельных минеральных частиц в геологических материалах нарушается и приводит к их разрушению. На интенсивность температурного выветривания также влияет размер и окрас минеральных частиц, входящих в его состав - темноокрашенные минеральные частицы нагреваются более интенсивно под воздействием солнечного света. В результате темные и крупнозернистые камни разрушаются быстрее.

В других случаях горная порода разрушается под механическим воздействием внешних веществ. Замерзающая вода оказывает особенно разрушительное действие в случае попадания в трещины и поры породы. При замерзании ее объем увеличивается на 9-10%, создавая при этом значительное давление, что в дальнейшем приводит к расщеплению геоматериала на отдельные фрагменты. Этот процесс называется морозным выветриванием.

Разрушение горных пород под воздействием физического выветривания всегда в определенной степени сопровождается химическим выветриванием, а в

некоторых случаях последнее играет решающую роль. Это отражает тесную взаимосвязь между различными формами уникальных процессов выветривания. Физический распад значительно увеличивает поверхность реакции эродированных пород.

В природных условиях отмечалась неравномерная эрозия геотехнических материалов. Это связано с различной степенью разрушения. Зона разрушения - это область, куда легче всего проникают вода и другие компоненты атмосферы, и в ней происходит интенсивный процесс глубокого выветривания. Среди многослойных и неоднородных по составу и твердости горных пород наименее прочные геологические материалы наиболее подвержены эрозии.

Рассмотрим более подробно процессы выветривания, проходящие в угле. Это явление представляет собой окисление угля, которое происходит в основном под воздействием атмосферного кислорода, насыщенной кислородом воды, циркулирующей в угольном пласте, и климатических факторов; значительное влияние оказывает одновременный процесс окисления минеральных компонентов угля. В целом, угольная эрозия - это сложный физико-механический процесс, который происходит в приповерхностной зоне одновременно. Физическое выветривание здесь относится к разрыхлению угля, в результате чего образуются рыхлые порошкообразные массы угля, называемые сажей; этот процесс сопровождается снижением мощности угольных пластов в зоне выветривания, и иногда частичным выносом минеральных компонентов.

Выветривание угля происходит также и в зоне вечной мерзлоты [38]. В этом случае характерно присутствие в водном экстракте из выветрелых мерзлотных углей уксусной, изовалериановой, фумаровой, щавелевой и других кислот.

Говоря о выветривании при воздействии низких температур, имеется в виду дезинтеграцию породы и формирование «структурных элементов» вследствие образования морозобойных трещин, расклинивающего действия замерзающей воды и других физических и физико-механических процессов, связанных с промерзанием и льдообразованием. Этот тип выветривания характерен для районов, отличающихся особо суровыми климатическими условиями, многолетней мерзлотой и

обусловленным ею избыточным поверхностным увлажнением. Непременно условие развития морозного выветривания – частые переходы температур через точку замерзания воды. Объемно-градиентные напряжения, вызванные главным образом, сильным переохлаждением зимой, приводят к появлению системы трещин, которые в дальнейшем разрабатываются замерзающей водой. При замерзании на породе действует высокое давление, теоретическая величина которого составляет давление около 200 МПа, Т. Пауэр в работе [39] описывает разрушительную силу льда. Это не столько расширение воды, когда она превращается в лед, сколько гидравлическое давление воды, которая еще не превратилась в лед, которая выталкивается до того, как она замерзнет. Как правило, вода в уголь проникает через микротрещины [40]. Механизм этого процесса определяется условиями льдообразования и миграции влаги.

Однако фактическое замораживание никогда не происходит полностью в закрытом объеме. Чтобы вода попала в трещину, трещина должна иметь выход на поверхность.

Морозная погода основана на воздействии гидравлического давления, упорядоченных водных структурах и эффектах взаимного оттаивания, которые противодействуют глубокому замерзанию. Когда замораживание и оттаивание чередуются, происходит движение частиц породы, что считается косвенным эффектом воздействия мороза. После размораживания частицы могут занять новое положение, а мелкие частицы могут попасть в трещины, которые препятствуют возвращению частиц в исходное положение. При повторном замораживании и оттаивании у породы, очевидно, будет больше шансов разрушиться быстрее, чем при стабильно низкой температуре, но реальные условия более сложные.

Таким образом, замораживание играет важную роль в физическом выветривании [41]. Чередование периодов промораживания и оттаивания вызывает более сильное разрушение, чем постоянное промораживание, и эффективность воздействия отрицательных температур зависит от частоты колебания температур около точки замерзания и наличия воды. Несмотря на то, что влияние промерзания зависит от частоты температурных колебаний около точки замерзания воды,

необходимо также время для того, чтобы температурные колебания проникли в структуру угля и для переноса скрытой теплоты, чтобы вызвать замерзание или оттаивание воды.

1.3 Изменение механических и потребительские свойства угольной продукции под влиянием циклического замораживания-оттаивания

В настоящее время в научных сообществах мира возрос интерес к исследованиям, связанным с воздействием различных климатических факторов на угольную продукцию, в том числе низкотемпературное воздействие.

Такой интерес обуславливается высокими потерями на различных этапах логистической цепочки от добывающего предприятия к потребителю, а также снижением качества добываемых углей на протяжении всей истории угледобычи, характеризующимся ростом влажности, а также снижением теплоты сгорания топлива. На текущий момент перед научным сообществом остро встал вопрос изучения характера и закономерностей изменения основных потребительских свойств добытого угля с целью понимания влияющих природных процессов и разработки мер профилактики по сохранению качества угольной продукции с учетом сложной логистической цепочки от добывающего предприятия к потребителю.

В данном разделе диссертационного исследования рассмотрен механизм образования углей, а также обозначены основные факторы, влияющие на свойства угольной продукции.

Природный уголь - это горючее вещество органического происхождения, в основе которых лежит преобразование за длительный временной период растительных остатков. Процесс химического превращение органических веществ различен, что обосновывает разнообразие генетических типов углей и его свойств, включая состав, структура угля, его различные и непостоянные степени влажности, и изменения в многомасштабных комплексах и параметрах пористости.

Согласно концепции последовательной стадии образования так называемых гумусовых углей, остатки органического материала растений постепенно

превращаются в торф, бурый уголь, каменный уголь и антрациты. Последовательность превращений называется стадией метаморфозы. Бурый уголь находится на самой низкой стадии, а антрацит - на самой высокой стадии метаморфизма.

На стадии бурых углей преобладают химические процессы поликонденсации при взаимодействии разнообразных активных функциональных групп, содержащих в молекулах гуминовых веществ, для которых характерно разнообразие размеров и природы конденсированного ароматического ядра и периферийных групп.

Метаморфизм каменных углей и антрацитов характеризуется химическими преобразованиями структуры, при этом уголь дополнительно накапливается в виде конденсированного ароматического слоя [42]. Часть углерода боковых радикалов вместе с водородом и кислородом удаляется в виде газов CO_2 и через пласты угля и окружающие породы.

Периодическими изменениями условий покрытия органической массы водой и осадочными породами объясняется образование многочисленных угольных напластований. Разнообразие морфологических различий и материального состава растительных остатков, а также неравномерная скорость их химического превращения привели к высокой степени неоднородности угольного вещества.

На фоне вышесказанного отдельно рассматривается влияние циклического замораживания-оттаивания на параметры углей различного происхождения. Качественно механизмы дезинтеграции углей и других типов горных пород во многом схожи. Однако развитое поровое пространство, а также высокая степень исходной нарушенности и относительно низкая исходная прочность делают угли крайне чувствительными к перепадам температуры. Так, в работах [43, 44, 45, 46] исследуется влияние циклического замораживания - оттаивания с помощью жидкого азота на механические свойства углей. В этих работах отмечается, что увеличение количества циклов замораживания-оттаивания приводит к нелинейному снижению прочности углей.

Помимо прочности, циклическое термическое воздействие также оказывает влияние на такие важные характеристики угля, как проницаемость для пластового метана [47, 48, 49, 50], теплотворную способность [51, 52] и даже склонность к

самовозгоранию [53]. Учитывая важность исследования изменения структуры и свойств угля под влиянием циклически изменяющихся температур, далее данные вопросы будут рассмотрены подробнее.

Условия, а также значительные сроки хранения и транспортировки угольной продукции приводят к ухудшению потребительских свойств, обусловленных процессами физико-химического выветривания. Степень влияния процессов выветривания зависит от марки сырья, природно-климатических характеристик районов добычи, хранения и использования, дополнительного насыщения влагой при транспортировке и хранении, подверженности воздействия кислорода к углю, порядка формирования штабелей, условий хранения и транспортирования с учетом степени метаморфизации углей [54,55,56].

Процессы выветривания угля ведут к необратимой трансформации органической составляющей угля начиная с этапа вскрытия угольных пластов при добыче. Интенсивность данных процессов увеличивается при движении угля в цепочках поставок, решающими факторами, помимо степени метаморфизации, являются скорость окислительной реакции, климат окружающей среды, продолжительность и этапы логистической цепочки [57].

Примером необратимой трансформации угля является изменение гранулометрического состава вследствие неравномерного высушивания разных слоев угля, что, в свою очередь становится причиной уменьшения объема, развития внутренних напряжений, приводящее к разрыву геоматериала на фракции.

В исследовании В. И. Федорова, В. Л. Гаврилова [58], выполненном на примере бурого угля Кангаласского месторождения, установлено влияние продолжительности хранения на такие качественные характеристики, как гранулометрический состав. Наблюдения показали динамику увеличения количества мелких классов с увеличением срока хранения угольной продукции, что отражено на рисунках 1.3.1-1.3.2.

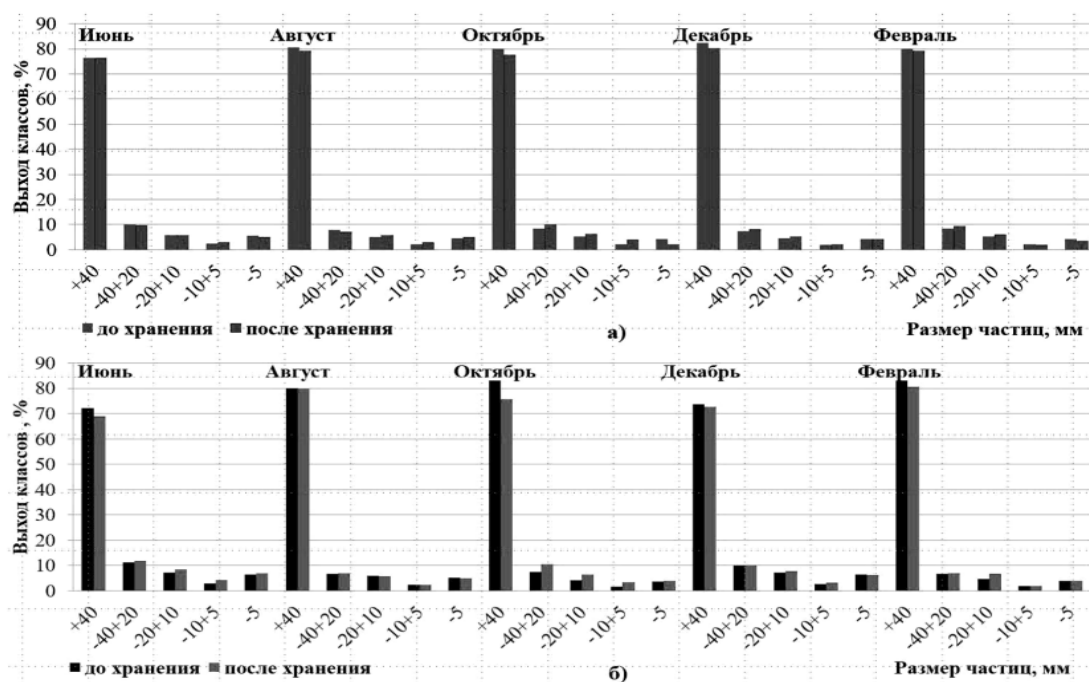


Рисунок 1.3.1 – Гранулометрический состав угля при хранении в мерзлом состоянии: а) в мешках, б) навалом

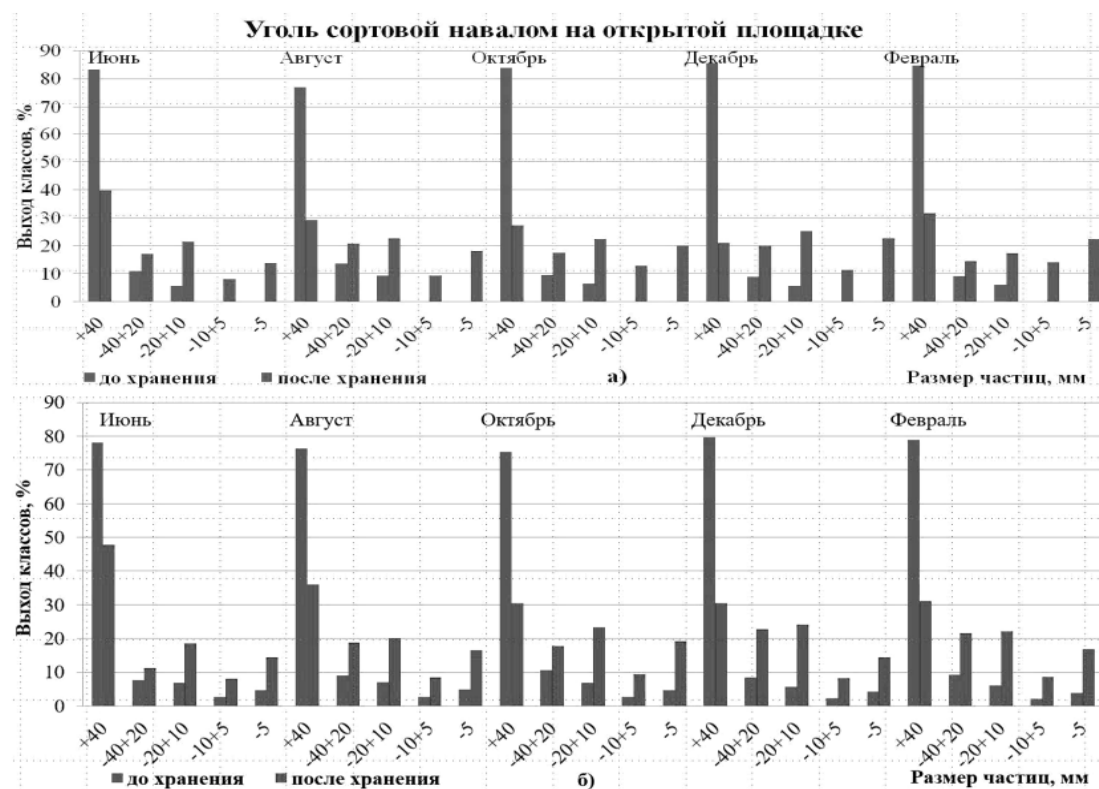


Рисунок 1.3.2 – Гранулометрический состав сортового и а) рядового угля при хранении навалом на открытой площадке

В статьях С.А. Эпштейн, Е.Л. Коссович, Н.Н. Добряковой, К.В. Агаркова [59] на оценка влиянию низкотемпературного циклического воздействия на гранулометрический состав. Оценка изменения гранулометрического состава приведена на примере углей с Апсатского, Печорского, Кангаласского месторождений. В результате исследований установлено, что изменение гранулометрического состава углей (образцы с размером частиц 0-3 мм) после низкотемпературной обработки не зависит от температуры замораживания. В то же время, с точки зрения перераспределения частиц по классам размеров, угли из Апсатское месторождение устойчиво к низкотемпературным воздействиям и не меняется после замораживания-оттаивания. Угли Печорского бассейна и бурые угли Кангаласского месторождения подвержены разрушению, поскольку после замораживания до -20°C и ниже наблюдается значительное (на 20% и более) снижение доли крупных частиц. Стойкость к разрушению исследуемых углей (с размером частиц 25—50 мм) после низкотемпературной обработки изменяется по-разному. Угли Печорского бассейна отличаются в характере сопротивления, изменяющегося в зависимости от температуры. Для угля, взятого из пачки, которая не представляет опасности с точки зрения внезапных выбросов, сопротивление постепенно снижается с повышением температуры замерзания. Это согласуется с известными данными об изменении механических свойств природных и композиционных материалов при циклических низкотемпературных воздействиях. Уголь, взятый из потенциально взрывоопасной упаковки, напротив, затвердевает при снижении температуры замерзания. Это может быть связано с известной степенью неоднородности структуры витринита этот уголь. Этот эффект упрочнения характерен для почв, расположенных в зонах, подверженных циклическому низкотемпературные воздействия. Для углей Апсатского месторождения, в органическом веществе которых преобладает витринит, наблюдается значительное снижение стойкости к разрушению только после цикла замораживания-оттаивания при самой низкой температуре -40°C .

Последнее, по-видимому, связано с образованием и разрушением гидратов углекислого газа. Сопротивление разрушению угля того же месторождения практически не изменяется после замораживания при всех рассмотренных

минимальных температурах. Разница в характере изменений сопротивления углей связана с различия в их петрографическом составе.

Характер изменения стойкости к разрушению бурых углей Кангаласского месторождения, представленный на рисунке 1.3.3, обусловлен различиями в содержании в них влаги, а также интенсивностью ее потери при замораживании при разных температурах.

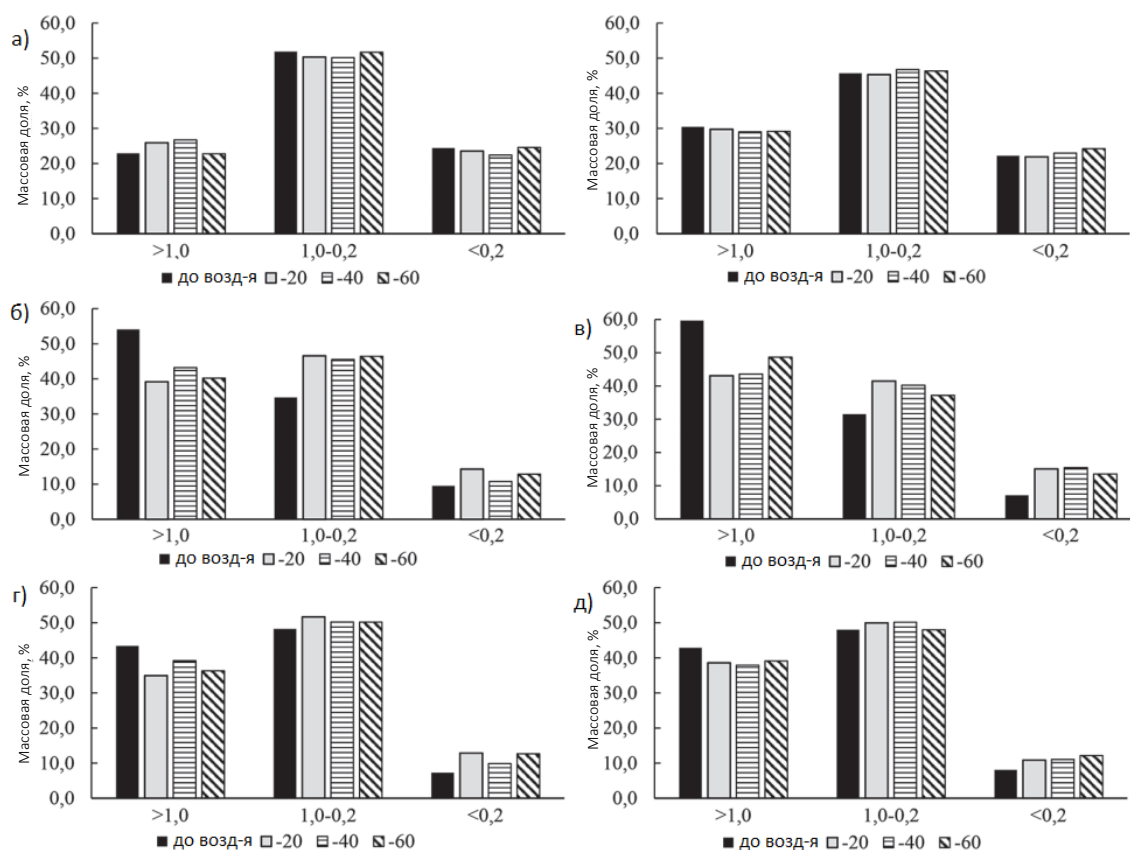


Рисунок 1.3.3 – Изменение гранулометрического состава проб углей менее 3 мм в зависимости от температуры обработки для углей:

Апсатского (а), Печорского (б, в), Кангаласского (г, д) бассейнов

Изменения состава при значительном сроке хранения выражается в сокращении содержания углерода, водорода и серы в угле и значительным увеличением количества кислорода и азота. Следствием является окисление угля, приводящее к уменьшению теплоты сгорания, что является критическим, в особенности для важно для низкометаморфизированного энергетического топлива. Это происходит из-за частичного окисления горючей массы угля. В работе В.С. Крыма [60]

установлено снижение теплоты сгорания угля уже через 6 месяцев хранения в штабелях с 1,5% до 4,9%.

При хранении угольного топлива наблюдается выделение двуокиси углерода и окиси углерода, а также водяного пара в результате разложения хрупких комплексов, образующихся при адсорбции кислорода. Объемное соотношение CO_2 : CO обычно не изменяется во время окисления.

В [60] приведены результаты оценки низшая теплота сгорания потребляемого угля, в результате которых установлено значительное ее сокращение (рисунки 1.3.4, 1.3.5).

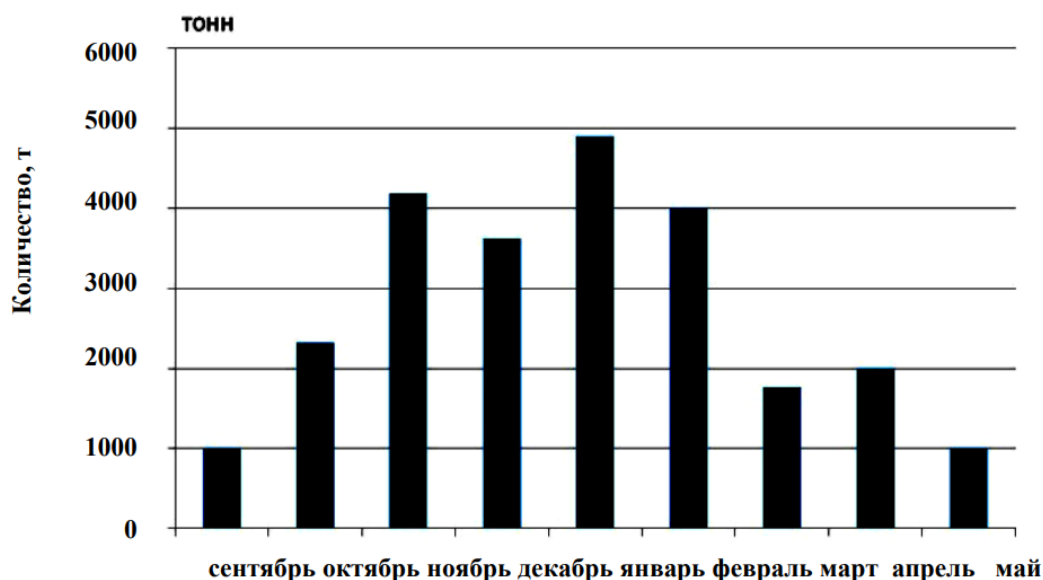


Рисунок 1.3.4 – Динамика потребления угля на примере Депутатской ТЭЦ в отопительный период 2011-2012 гг

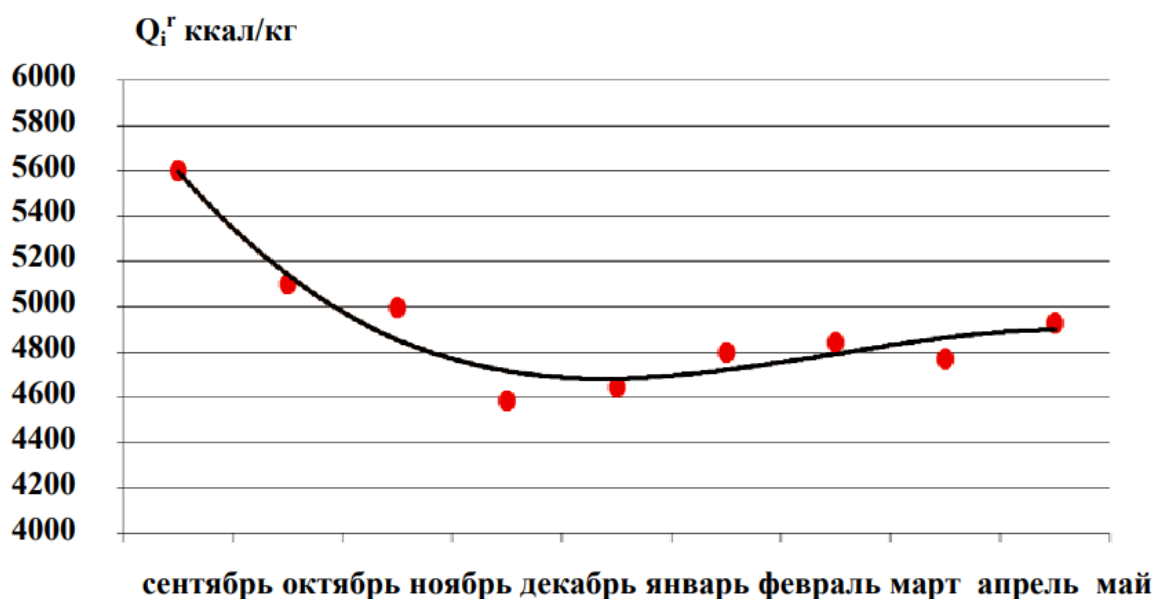


Рисунок 1.3.5 – Изменение низшей теплоты сгорания в рабочем состоянии (Q_i^r , ккал/кг) Джебарики-Хайского угля на расходном складе Депутатской ТЭЦ

Потери энергетической ценности исследуемого угля составили 19,2% при нормируемых потерях 8-11% [61]

Еще одним негативным воздействием длительного хранения и транспортировки угля при низкотемпературном воздействии, становится ухудшение процесса спекания (коксования) угля, что связано с окислением на начальной стадии [62].

К необратимым изменениям поверхности и структуры угля также приводит химическое окисление совместно с процессом адсорбции, сопровождающийся ростом гидрофильности угля [63].

Также стоит отметить сокращение выхода химических продуктов коксования, выхода смол. Выделение тепла в процессе выветривания при окислении может вызвать самовозгорание угля [64]. Размер кусков угля также сказывается на склонности угля к самовозгоранию, а именно уменьшение фракций кускового угля из-за площади его удельной поверхности.

Выполненные исследования в промышленных условиях обнаруживают, что установку срока хранения угольной продукции следует осуществлять в соответствии со склонностью к окислению: наиболее стабильная, стабильная, умеренно стабильная, нестабильная с повышенной активностью, при этом срок хранения

составляет 24-36, 18, 12 и 4-8 месяцев [65]. При применении [66] предельные сроки хранения углей могут составлять 6 лет, 4, 3 и 2 года соответственно.

1.4 Общая характеристика методов оценки степени нарушенности угля при ЦЗО

Для изучения динамики свойств и состояний геоматериалов следует проводить измерения в соответствующей локальной зоне в режиме непрерывного или дискретно-непрерывного мониторинга. Так как выветривание приводит к изменению практически всех физических свойств, то для исследований в данной области могут быть использованы любые методы (рисунок 1.4.1), позволяющие зафиксировать данные изменения. Решающим фактором при выборе методов является фактическая чувствительность и разрешающая способность метода, степень его помехозащищенности по отношению к искажающим факторам различной физической природы, технологичность, аппаратное обеспечение и экономическая целесообразность.



Рисунок 1.4.1 – Классификация существующих методов оценки выветривания горных пород

В ходе многолетних исследований низкотемпературного воздействия было выявлено значительное влияние температуры на механические свойства горных пород. В исследованиях, выполненных Winkler E M. [67] определено, что фазовые переходы в поровой влаге провоцируют возникновение давления, превышающего величину горного давления. Учеными Finnie I, Nicholson D T, Lin J, Ren T, и другими [68, 69, 70, 71] установлено, что горные породы различных генотипов под воздействием отрицательных температур, значительно теряют прочность (фактически до разрушения).

Снижение механической прочности при замораживании, согласно экспериментальным исследованиям [72, 73, 74] связано с содержанием воды, скоростью и продолжительностью замораживания, особенностью петрографического состава геоматериала, содержанием воды, скоростью и продолжительностью замораживания, а также особенностями петрографического состава пород.

Одним из методов оценки влияния выветривания на геоматериалы является метод лабораторного моделирования [75]. В лабораторных условиях воспроизводятся процессы, происходящих под воздействием природных и техногенных факторов, что позволяет изучить изменения структуры, состава и свойств образцов геоматериалов. Благодаря искусственному воспроизведению процессов выветривания данный метод исследования позволяет смоделировать выветривание в естественных условиях за сокращенный срок. В то же время стоит отметить, что моделирование материалов не позволяет воспроизвести реальные факторы естественного и искусственного воздействия на геоматериалы с учетом всех возможных комбинаций факторов и взаимовлияний.

Наряду с вещественным моделированием используется математическое моделирование [76] процессов в смёрзшемся угле для исследования его теплофизических свойств и склонности к самовозгоранию при хранении под воздействием климатических факторов. Однако данный метод ограничивает степень возможных объяснений самовозгорания углей, характеризуется несовершенством оценочных теорий как основы их конструкций.

Для оценки выветривания геоматериала на образцах получил известность метод растровой электронной микроскопии, представленный в [77,16,78,79]. Данный способ исследования позволяет выявить обусловленные выветриванием изменения микростроения геоматериала, в особенности изменения поровой пустотности и трещиноватости, особенности изменения минерального состава. Исследование структуры углей заключается в изучении рельефа их аншлифов-кусков под микроскопом (рисунок 1.4.2).

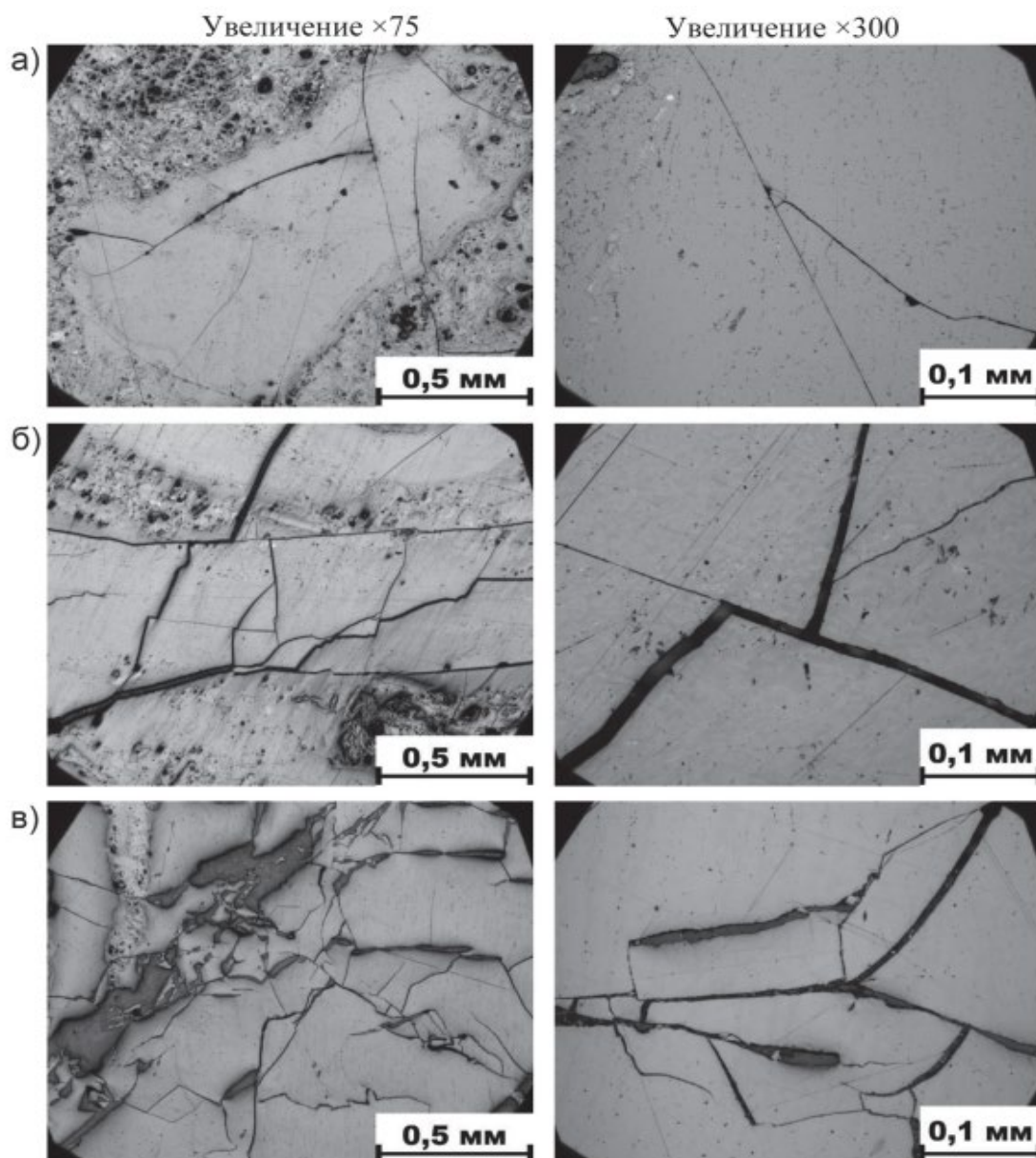


Рисунок 1.4.2 – Качественная оценка трещиноватости поверхности угля с помощью микроскопа в зависимости от количества циклов замораживания-разморозки: исходный уголь (а); после 1 цикла заморозки-оттаивания (б); уголь после 4 циклов заморозки-оттаивания (в)

Однако метод растровой электронной микроскопии требует трудоемкой подготовки образцов, что делает его непроизводительным. Также данный метод дает информацию исключительно о поверхностной области исследуемого образца и не позволяет оценить изменения внутренней структуры образца. Еще одним недостатком данного метода является невозможность его использования в полевых условиях.

Еще одним методом оценки структуры угля под влиянием различных факторов является метод наноиндентирования [80, 81], позволяющим изучать закономерности поведения приповерхностных слоев образца угля, субмикронных объемов, кластеров. Наноиндентирование можно назвать общим методом изучения механических свойств материалов, но этот метод, конечно, не лишен: на результаты измерений влияет большое количество факторов, и источником неопределенности может быть не только технология измерения, но и расчетные методы или сам образец.

Помимо указанных методов исследования, существуют методы [82], позволяющие оценить относительную степень окисления под атмосферным воздействием в битуминозном угле путем щелочной экстракции. Однако такие методы не позволяют оценить изменения структуры угля при климатическом воздействии, а также скорость таких изменений, не дают информации о трещиновато-пористой структуре угля.

Для оценки структуры геоматериалов в пласте используют такие методы как сейсмический метод преломленных волн [83], основанный на выявлении мощностей зон выветривания, оценка закономерностей увеличения скорости в зоне выветривания по преломлению годографа, определение выветривания на массиве горных пород. Недостатком таких методов является невозможность применения данного метода для решения задач по оценке внутренней структуры непосредственно угольной продукции. Аналогичная проблема существует также и для других методов, таких как ультразвуковой каротаж [84], электрометрический метод оценки (ВЭЗ, ГГК) [85].

Еще одним методом оценки структуры геоматериалов может служить рентгеновская компьютерная томография [86, 87, 88]. Данный метод позволяет выявлять дефекты, такие как поры, трещины, включения во всем объеме исследуемого образца, получать количественную оценку дефектности исследуемых образцов.

Ограничения при исследовании указанными методами усложняет и удорожает оперативное исследование воздействия климатических факторов, в том числе изучение влияния циклического низкотемпературного воздействия с целью обеспечения управления состоянием угольной продукции, а также угольного массива в целом, недопущения окисления угольной продукции, ведущего к ухудшению ее качества и самовозгоранию. Пренебрежение прогнозом изменения свойств угля при ЦЗО [89] приводит к различным негативным последствиям, таким как самовозгорание угля, сбои в цепочке поставок, потерям угольной продукции.

1.5 Применение акустических методов для оценки и прогноза степени поврежденности углей под влиянием циклического замораживания-оттаивания

Для изучения формирования и развития нарушенности углей, подвергаемых циклическому замораживанию-оттаиванию, используется ограниченный ряд методов.

Получение информации о физико-механических свойствах осуществляется сегодня преимущественно с использованием лабораторных исследований на образцах. При этом реализуются два принципиально разных подхода. В рамках первого из них измеряют деформации образцов в процессе их механического нагружения [90].

В рамках второго подхода проводят ультразвуковые (УЗ) измерения с использованием различных типов упругих волн, видов сигналов и их информативных параметров, позволяющих определить искомые свойства геоматериала на основе соответствующих функциональных или корреляционных зависимостей [91, 92, 93, 94, 95, 96].

Ультразвуковые измерения подразделяются на пассивные и активные.

Пассивные методы, как правило, основаны на измерении основных параметров акустической эмиссии одноосно нагружаемых углей, предварительно подвергнутых различным низкотемпературным воздействиям [97, 98]. Иногда вместо механических используются другие физические воздействия, например, быстрое нагревание образца с одновременным измерением активности акустической эмиссии [99]. Подобный подход позволяет получить информацию о склонности угля к нарушению структуры, возникшей после циклического термического воздействия. Основным недостатком такого подхода является фактическое разрушение образца после тестового воздействия, что делает невозможным проведение многократных измерений на одних и тех же образцах.

Указанного недостатка лишены активные ультразвуковые (УЗ) измерения [100]. Они предполагают анализ изменений кинематических информативных параметров УЗ сигналов в одних и тех же образцах угля при различных режимах испытанных низкотемпературных воздействий. Основными из таких параметров до настоящего времени остаются скорости распространения продольных V_p и, значительно реже, поперечных V_s упругих волн. В частности, в [101] показано, что величина V_p экспоненциально снижается при увеличении времени замораживания и количества циклов замораживания-оттаивания образцов угля, а также зависит от содержания в них влаги. В то же время известно, что скорость распространения упругих колебаний обладает достаточно низкой чувствительностью по отношению к динамике повреждённости геоматериалов [102].

Существуют также методы оценки структуры образцов, как ультразвуковая структуроскопия [103,104,105]. Данные методы позволяют визуализировать внутреннюю структуру исследуемых геоматериалов для проведения качественной оценке при воздействии циклического замораживания-оттаивания.

Расширение возможности получения данных при УЗ-исследованиях заключается в использовании спектральной обработки УЗ сигналов [106, 107, 108], где в качестве информативных параметров используются значения ширины спектра ΔF , а также частота спектрального максимума F_{max} .

1.6 Цель и задачи исследования

По результатам анализа отечественных и зарубежных литературных источников можно сделать следующие выводы:

1. На текущий момент изучение характера и закономерностей изменения основных потребительских свойств добытого угля с целью понимания влияющих природных процессов с учетом сложной логистической цепочки от добывающего предприятия к потребителю является важнейшей задачей, сохранения качества угольной продукции.

2. Необходимым условием решения отмеченных в п.1 задач является наличие надёжных и простых в применении способов оценки влияния различных климатических факторов на качество угольной продукции, прежде всего, влияния циклически изменяющихся температур от положительных до отрицательных значений на структуру, свойства и состояние углей непосредственно от добычи до доставки угольной продукции потребителю.

3. Для получения указанной в п.3 информации о структуре, свойствах и состоянии углей при влиянии низких температур относительно широкое распространение получили методы поверхностной оценки структуры угля, в частности методы микро- наноиндентирования, методы электронной микроскопии, которые позволяют оценить только поверхность исследуемых угольных материалов. Существующие же методы ультразвуковой и рентгеновской томографии, несмотря на известные достоинства, во многом не удовлетворяют требованиям простоты, эффективности и экономической целесообразности.

4. Активные ультразвуковые методы признаны в наибольшей степени отвечающими комплексу требований по точности, производительности и оперативности контроля. При этом, наиболее чувствительными и информативными являются методы с использованием поперечных волн, а также продольных в сочетании со спектральной обработкой сигнала. Данные методы позволяют качественно оценить внутреннюю структуру геоматериалов и динамику их нарушенности под влиянием климатических факторов различной физической природы. С целью совершенствования указанных методов выявлена необходимость установления закономерностей

влияния циклического замораживания-оттаивания на параметры ультразвукового сигнала в образцах угля, обоснование и разработка на этой основе способов оценки нарушенности углей различных видов.

Отмеченное выше, определяет следующую цель настоящей работы: Использование динамических и спектральных характеристик ультразвуковых импульсов для анализа дефектообразования в образцах угля различных видов под воздействием циклического замораживания-оттаивания.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи диссертационного исследования:

1. Обоснование принципов и выбор оптимальных информативных параметров экспериментального исследования влияния ЦЗО на параметры ультразвуковых сигналов в образцах угля различных видов.
2. Разработка специализированного лабораторного оборудования для проведения ультразвуковых исследований на образцах угля, подвергаемых ЦЗО.
3. Экспериментальное исследование влияния количества циклов замораживания-оттаивания на кинематические, динамические и спектральные параметры поперечных волн с управляемым вектором поляризации.
4. Установление закономерностей влияния ЦЗО на спектральные параметры продольных волн в образцах угля различных видов при различных уровнях содержания влаги.
5. Обоснование и разработка комплексных ультразвуковых способов оценки степени поврежденности углей, подвергнутых ЦЗО.

2 МЕТОДИЧЕСКОЕ И АППАРАТУРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ АКТИВНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАРУШЕННОСТИ ОБРАЗЦОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЦЗО

2.1 Сведения об образцах, используемых при оценке нарушенности под влиянием ЦЗО

В исследованиях, направленных на разработку активных ультразвуковых способов оценки поврежденности углей под влиянием циклического замораживания-оттаивания, участвовали три группы образцов углей, отобранных на месторождениях Донецкого бассейна (антрациты), а также Бородинского (бурый уголь) и Апсатского (каменный уголь) месторождений. Параметры образцов и усредненные по группам характеристики углей приведены в таблице 2.1.1.

Таблица 2.1.1 – Характеристики образцов углей

Группа	Наименование группы	Мацеральный состав, % об.				Экспресс-анализ, %по массе			Прочность на одноосное сжатие, МПа	Плотность, кг/м ³
		V _H	S _v	I	L	W ^a	A ^d	V ^{daf}		
Антрацит (Восточный Донбасс)	А	85	6	9	0	1,2	4,3	3,5	22	1600
Каменный уголь (Апсатское месторождение)	К	93	-	7	0	16,8	7,2	47,9	12	1120
Бурый уголь (Бородинское месторождение)	Б	71	13	16	0	0,6	9,0	1,8	15,2	1360

Угли, используемые в данном исследовании, характеризуются различной степенью метаморфизма, петрографического состава, обладают различными свойствами.

Антрациты характеризуются [109] изменениями роста аналитической влаги (W_a), уменьшением объемного выхода летучих веществ (V^{daf}), ростом плотности и прочности, микротвердости [110, 111, 112, 113].

В Антрацитах Восточного Донбасса содержание углерода изменяется в пределах $C^{daf} = 94.5\text{--}97\%$, водорода $H^{daf} = 1.1\text{--}2.2\%$, объемный выход летучих = 46–170 см³/г.

Каменные угли Апсатского месторождения (малосернистые, малозольные, трещиноватые, хрупкие, гумусовые) характеризуются высокой теплотой сгорания [114].

Основу петрографического состава [115] составляют мацералы (34—99%) группы витринитов, в меньшей степени инертиниты (1—38%), семивитриниты (2—36%), липтениты (1—3%). Степень метаморфизма меняется по простиранию угольных пластов и на глубину.

Угольные залежи, характеризующиеся повышенной хрупкостью, трещиноватостью, высокой теплотой сгорания, газоносностью в виде метана с характерными примесями углеводородов (0,01-8%) и водорода (1-26%).

Угли Бородинского месторождения угли по петрографическому составу существенно не отличаются между собой и согласно вещественно-петрографической классификации относятся к группе гумолитов, классу гелитолитов, подклассу гелитов и типу гелитов. Они обладают устойчивыми показателями качества, энергетическими и технологическими свойствами. Низшая теплота сгорания – у угля составляет от 3 900 до 4 100 ккал/гр. Содержание влаги в бородинском угле достигает 32 сильно снижает энергоэффективность данного вида угля по сравнению другими разновидностями бурых углей. Зольность – у бородинского угля средние показатели зольности, составляет порядка 20-25%.

Мацералы образуют линзы, полосы и неправильные включения, микроструктура линзовидно-слоистая, слоистая, и местами беспорядочная. Петрографический состав изученных углей представлен витринитом, семивитринитом, инертинитом и липтинитом, включениями различных минералов [116]

Полученные предварительно усредненные значения предела прочности при сжатии составляли для антрацита — $\sigma = 22$ МПа, для каменного угля — $\sigma = 15,2$ МПа, для бурого угля — $\sigma = 12$ МПа.

Подготовка образцов заключалась в сухом шлифовании их поверхности до образования двух параллельных граней. Поверхность угля после подготовке должна быть плоской, без рельефа и царапин. При подготовке образцов применялись шлифовальные абразивные материалы - карборундовые наждачные бумаги с убывающим размером зерен.

Требования к поверхности образцов заключаются в отсутствии на поверхности образца следующих дефектов:

- деформации;
- царапин;
- выбоин;
- внедрения инородных частиц;
- смазывания;
- рельефа поверхности или завала края;
- термических повреждений;

Окончательная поверхность образца должна быть достаточно хорошей для получения объективных результатов исследования. При данной подготовке методом сухого шлифования о создании двух параллельных граней минимизированы чрезмерные требования, увеличивающие время и стоимость процесса.

Высота образцов, равная базе прозвучивания, принимается исходя из аппаратного обеспечения эксперимента. Условия выбора высоты образцов приведены в разделах 2.2-2.3 настоящей главы.

2.2 Использование поперечных колебаний при оценке степени нарушения углей под влиянием ЦЗО

Наиболее полно возможности УЗ методов исследования геоматериалов реализуются при использовании не только продольных (P), но и других типов упругих волн, прежде всего поперечных (S). По измеренным скоростям их распространения V_p и V_s можно определить скорости всех типов волн и динамические упругие модули геоматериала.

Кроме того, поскольку для длин S и P волн всегда выполняется соотношение $\lambda_s < \lambda$ то S -волны (прежде всего, их амплитудные и спектральные информативные параметры) более чувствительны к структурным элементам и трещиновидным дефектам геосреды, особенно если они ориентированы перпендикулярно вектору поляризации сдвиговых колебаний.

Благодаря такой чувствительности использование S -волн (особенно их динамических информативных параметров) оказывается чрезвычайно перспективным для оценки анизотропии геоматериалов и динамики их нарушения под влиянием факторов различной физической природы [117, 118, 119].

Для проведения УЗ измерений был использован представленный на Рисунке 2.2.1 лабораторный стенд, основу которого составлял разработанный Ф.Ф. Горбачевичем акустополарископ (АП) [120]. Последний представляет собой устройство, содержащее излучающий и приемный УЗ преобразователи S -волн с рабочей частотой 600 кГц, закрепленные на специальной раме так, чтобы ориентация плоскостей их поляризации совпадала. Принципиальной особенностью АП является реализованная в нем возможность вращения размещенного между ПЭП образца вокруг своей оси на 360° с заданным шагом, начиная с 1° . Кроме того, авторский вариант АП был дополнен цифровым устройством контроля прижима ПЭП к образцу, что обеспечивало минимизацию влияния указанного прижима на характеристики электроакустического измерительного тракта при переходе на каждый последующий шаг измерений.

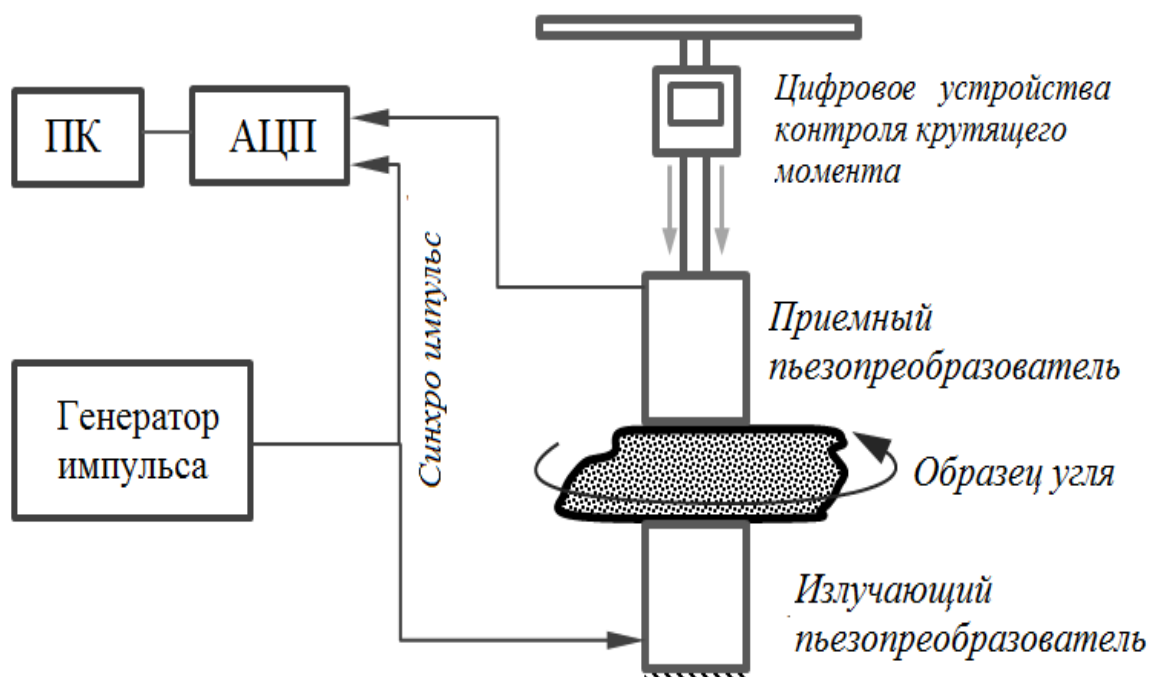
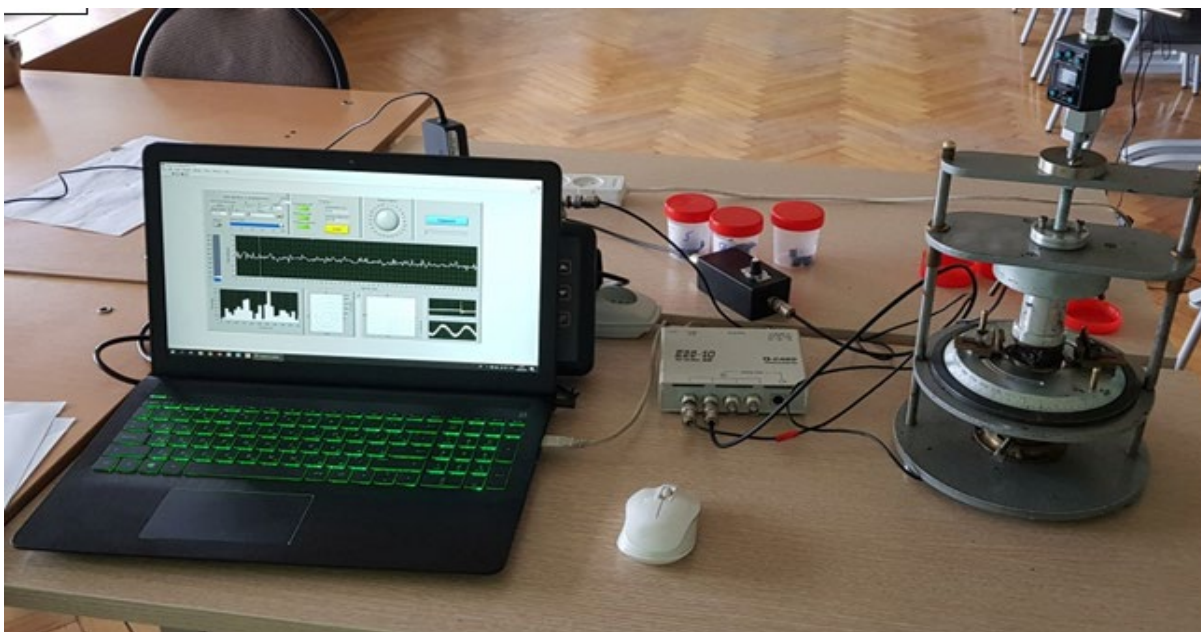


Рисунок 2.2.1 – Лабораторный стенд для ультразвуковых исследований

В отличие от обычно используемых в комплекте с АП для проведения УЗ измерений дефектоскопов (например, УД2-12 или УД2-16) лабораторный стенд был снабжен импульсным генератором дефектоскопа УД2Н-ПМ (таблица 2.2.1), обеспечивающим возбуждение излучающего ПЭП электрическим сигналом в виде меандра амплитудой 300 В, а также аналого-цифровым преобразователем E20-10 (таблица 2.2.2) с частотой дискретизации 5 МГц.

Таблица 2.2.1 – Характеристики генератора импульса УДН2Н-ПМ

Развертка	мин.: 0 - 160 мкс макс.: 0 - 10000 мкс
Диапазон скоростей	100 - 4000 м/с
Задержка	от 0 мкс до 7350 мкс
Зондирующий импульс	радиоимпульс амплитудой 200 В, частота заполнения задается от 20 до 2500 кГц, количество периодов задается от 1 до 32
Усилитель	широкополосный от 20 до 2500 кГц с фильтрами на 50, 100, 200 и 400 кГц
Диапазон регулировки усиления	90 дБ, с шагом 0.5, 1, 2 и 6 дБ
Детектирование	полное, положительная/отрицательная полуволна, радиосигнал
Отсечка	компенсированная, 0 - 80% высоты экрана

Таблица 2.2.2 – Техническая характеристика аналого-цифрового преобразователя E20-10

Разрядность АЦП	14 бит
Максимальная частота преобразования АЦП	10 МГц
Поддиапазоны измерения напряжения	$\pm 3,0$ В; $\pm 1,0$ В; $\pm 0,3$ В (независимая настройка для каждого канала)
Тип аналоговых входов АЦП	"С общей землёй", экранированный
Нижняя частота полосы пропускания тракта преобразования	0 Гц
Типичное значение верхней частоты полосы пропускания тракта преобразования по уровню -3 дБ	1,2 МГц (на всех поддиапазонах E20-10, E20-10-D, E20-10-D-I) 4,5 МГц (на поддиапазоне $\pm 3,0$ В E20-10-1, E20-10-D-1, E20-10-D-1-I) 5,2 МГц (на поддиапазоне $\pm 1,0$ В E20-10-1, E20-10-D-1, E20-10-D-1-I) 3,5 МГц (на поддиапазоне $\pm 0,3$ В E20-10-1, E20-10-D-1, E20-10-D-1-I)
Типичное отношение сигнал-шум канала АЦП	73 дБ
Межканальное прохождение, не более:	
- на постоянном напряжении	-70 дБ
- на частоте 1 кГц	-75 дБ
- на частоте 1 МГц	-65 дБ

Оцифрованный принятый сигнал регистрировался на персональном компьютере в виде записей длительностью 205 мс, или 1024 отсчетов. По указанным записям с учетом осреднения результатов 50 последовательных измерений

автоматически вычислялись искомые значения скорости распространения V_s , и амплитуды A_s первой полуволны поперечных упругих волн.

На поверхность подготовленных образцов наносилась метка, отмечающее начальное положение при ультразвуковом прозвучивании ($\theta = 0^\circ$). Перед началом циклического термического воздействия на всех образцах экспериментально определялись значения V_s , и A_s с шагом $\theta = 30^\circ$. Таким образом, формировался массив данных о первичном состоянии углей (0 цикл). Результаты измерений представлялись в виде полярных диаграмм распределения информативного параметра в функции от угла поворота.

Далее образцы помещались в климатическую камеру «КТНВ-150» (Рисунок 2.2.2) со следующими характеристиками: объем — 150 л, диапазон задаваемых температур от -70 до $+150^\circ\text{C}$ (точность поддержания температуры $\pm 0,5^\circ\text{C}$), где производилось их циклическое замораживание-оттаивание в температурном диапазоне от -40°C до $+20^\circ\text{C}$ по программе, проиллюстрированной на Рисунке 2.2.3. Диапазон задаваемой относительной влажности в камере от 20 до 98% с допустимым отклонением от 1 до 3%. В камере реализовано воздушное охлаждение рабочей зоны. Уровень влажности окружающего воздуха оставался постоянным и равным 30%. Повторные исследования акустических свойств образцов производились после 1, 3, 6, 10 и 15 циклов замораживания-оттаивания. На время проведения экспериментов образцы угля хранились в герметичных контейнерах, обеспечивающих постоянство влажности всех проб.



Рисунок 2.2.2 – Программируемая климатическая камера КТХВ-2.4.1

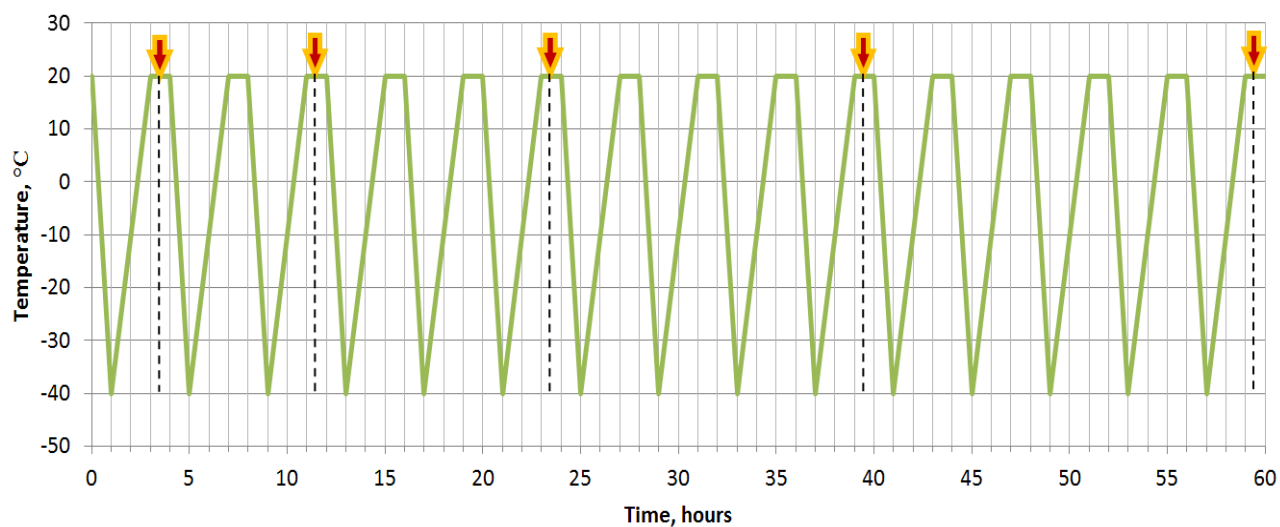


Рисунок 2.2.3 – Схема циклического замораживания-оттаивания (стрелки указывают процедуру ультразвукового контроля)

Интегральная оценка степени дефектообразования в образцах углей производилась по площади S , ограниченной полярной диаграммой:

$$S = \sum_{i=1}^n A_s, \quad (2.2.1)$$

где n – количество измерений при различных углах θ .

Снижение площади S соответствует росту затухания в образце, что свидетельствует об образовании в нем новых дефектов.

Для характеристики склонности углей к развитию поврежденности под влиянием циклического замораживания-оттаивания можно использовать коэффициент устойчивости к ЦЗО $k_{c.d.}$

$$k_{c.d.} = \frac{S^*}{S_0}, \quad (2.2.2)$$

где S^* - площадь полярной диаграммы на цикле, после которого начинается вымораживание параметра S , S_0 – площадь полярной диаграммы в нулевом цикле. Коэффициент $k_{c.d.}$ изменяется в диапазоне от 0 до 1, при этом 1 означает отсутствие устойчивости к повреждению; 0 – устойчивость к повреждению.

2.3 Особенности обеспечения контактных условий при оценке нарушенности под влиянием ЦЗО при использовании поперечных упругих колебаний

На уровень первого вступления принимаемого сигнала S -волн влияют ряд факторов. Среди наиболее значимых следует выделить два. Это, во-первых, давление P прижима ПЭП к образцу. С одной стороны, с увеличением величины P контактные условия (КУ) ПЭП с образцом улучшаются, однако с другой — при достижении некоторого критического уровня напряжений $\sigma_{кр}$ в образце возникают структурные изменения, как следствие теряется важнейшее преимущество УЗ измерений, связанное с отсутствием их влияния на искомые свойства геоматериала. Опыт показывает, что для отсутствия такого влияния необходимо, чтобы создаваемое в образце прижимным давлением значение $\sigma_{кр}$ не превышало $0,5\sigma_{сж}$. При этом геоматериал гарантированно не выходит за пределы стадии уплотнения [121].

Вторым фактором, определяющим качество КУ ПЭП S -волн с образцами угля, является вязкость контактной среды, размещаемой между ПЭП и поверхностями ввода и приема УЗ сигнала.

Задача возбуждения и приема продольных упругих волн в важном для исследования на образцах горных пород диапазоне частот решается сегодня с использованием относительно простых и эффективных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП) типа «продольный вибратор» [122]. В то же время, соответствующая задача для поперечных волн является более сложной. Первоначально она решалась на основе использования ПЭП с поперечно поляризованной пьезокерамикой. Однако они не нашли широкого применения, так как в диапазоне частот 200–600 кГц не обеспечивали необходимое соотношение «сигнал-помеха» относительно продольных колебаний и высокочастотных паразитных составляющих [123]. Более эффективным оказался подход, при котором пьезоэлемент излучает *P*-волну в звукопровод, состоящий из двух частей с различными волновыми сопротивлениями. Причем граница раздела между указанными частями находится под таким углом к падающей *P*-волне, при котором реализуется ее эффективная трансформация в *S*-волну, распространяющуюся ортогонально поверхности объекта контроля (ОК) [124, 125].

Передача сдвиговых колебаний в объект контроля (ОК) представляет определенную проблему, которая решается обычно либо приклеиванием рабочей поверхности ПЭП к поверхности ввода УЗ сигнала в образец, либо использованием вязкой контактной среды, размещаемой между протектором ПЭП и поверхностью ввода УЗ сигнала в образец. Например, в [126] показана эффективность использования в качестве такой среды высоковязкого раствора некристаллизующихся полисахаридов. Следует иметь в виду, что упомянутая контактная среда использовалась преимущественно для УЗ контроля образцов скальных и полускальных пород с относительно низкой пористостью и значительной прочностью. Это позволяло реализовать высокое и стабильное в процессе всего цикла измерений прижимное давление ПЭП к ОК, которое обеспечивало минимизацию потерь и изменений акустической мощности в контактных слоях, а значит и связанные с ними аддитивные и мультипликативные помехи в акустическом тракте. Соответствующий опыт обеспечения контактных условий ПЭП *S*-волн с образцами угля на сегодня отсутствует.

В связи с этим в рамках настоящей работы анализируются помеховые факторы, оказывающие влияние на излучение и прием S -волн в образцы угля, и рассматриваются некоторые технические решения, позволяющие минимизировать указанное влияние.

При недостаточной вязкости эффективность передачи сдвиговых колебаний в ОК резко падает. Казалось бы, такую передачу можно реализовать путем применения в качестве контактной среды упомянутых выше высоковязких растворов некристаллизующихся полисахаридов. Однако по ряду причин при УЗ исследованиях углей такое применение оказывается невозможным. Во-первых, это связано с относительно высокой трещиноватостью и пористостью углей, в результате чего контактная среда проникает в геоматериал, изменяя его свойства. Во-вторых, вязкость таких растворов сильно зависит от количества в них влаги. Если это количество велико, то молекулы сахарозы покрыты слоем из молекул воды и поэтому относительно свободны. При высокой концентрации сахарозы (как это имеет место, например, у природного и искусственного меда) ее молекулы образуют друг с другом водородные связи, обеспечивающую высокую вязкость. Наконец, в-третьих, свойства (в частности вязкость) полисахаридов существенно зависят от температуры, что ограничивает их применение при исследовании динамики акустических свойств углей под влиянием изменяющихся термических воздействий.

В связи с изложенным предлагается исключить применение жидких контактных сред для ввода и приема S -волн в образцы угля, заменив их наждачной бумагой (шлифовальной шкурки), используемой либо непосредственно в качестве протектора ПЭП, либо приклеиваемой к жесткой поверхности существующего металлического протектора. Для подтверждения возможности такой замены на описанном выше стенде были проведены исследования волновых форм сигналов S -волн, прошедших через образцы антрацита, каменного и бурого угля. На Рисунке 2.3.1 в качестве примера приведены такие зависимости для антрацита, полученные при использовании в качестве контактной среды меда и наждачной бумаги с различным размером зерна. Отметим, что на Рисунке 2.3.1 использована маркировка наждачной бумаги в соответствии с ISO 6344 Для P30, P60, P180 и P400 основной размер

абразивных частиц (зерна) составляет соответственно 600 мкм, 250 мкм, 75 мкм и 35 мкм.

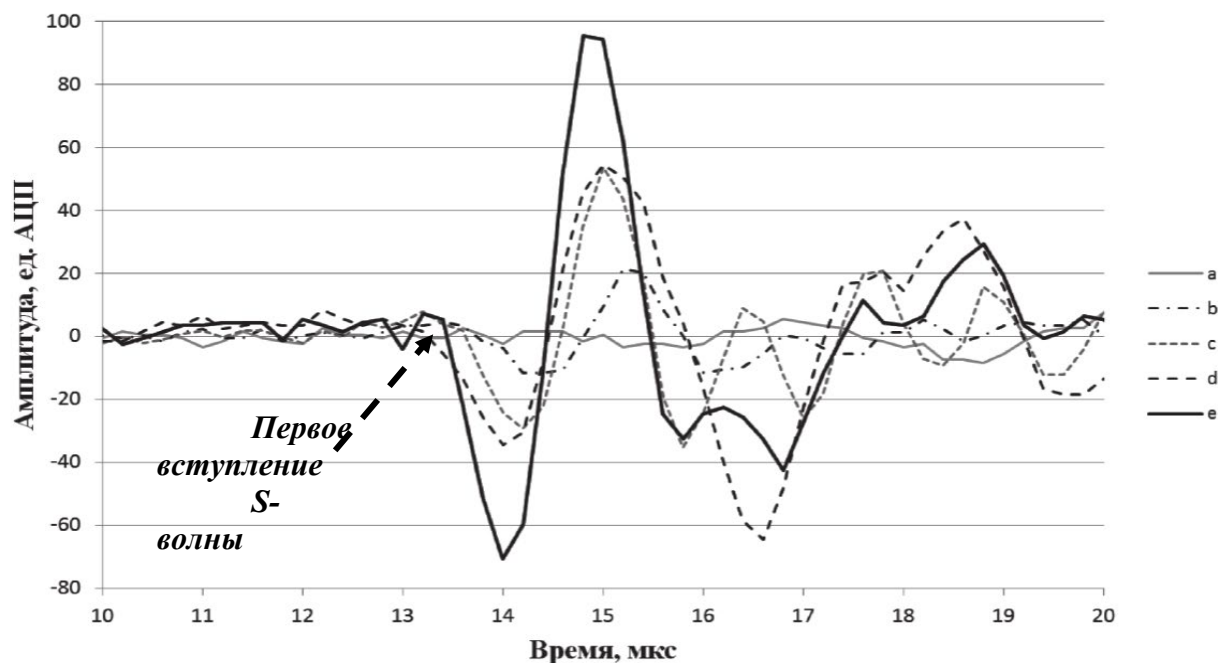


Рисунок 2.3.1 – Волновые формы зарегистрированных сигналов при использовании в качестве контактной среды между ПЭП и образцом антрацита наждачной бумаги Р30 (а), Р60(б), Р180 (с), Р400 (d), и высоковязкого раствора некристаллизованного полисахарида (е)

Анализ рисунка 2.2.2 показывает, что применение в качестве контактной среды наждачной бумаги по сравнению с медом обеспечивает значительно более низкий уровень амплитуды первой полуволны сигнала поперечных волн. Однако уже для Р60 этот уровень вполне достаточен для дальнейших акустоэлектрических преобразований и измерений величин V_s и A_s . Видно также, что для антрацита уровень амплитуды первой S -полуволны зависит от ее зернистости, с уменьшением которой этот уровень устойчиво растет.

Волновые формы сигналов, были получены также для каменного и бурого углей. В целом они схожи с представленными на Рисунке 2.2.2, то есть полученными на антраците. Вообще, учитывая современный уровень электроники, для

практического измерения параметров S -волны, важно не столько абсолютное значение A_s , сколько отношение сигнал/шум (С/Ш) на выходе приемного ПЭП.

Под шумом здесь имеется в виду уровень огибающей колебательного процесса, предшествующего первому вступлению S -волны. Отношение С/Ш для антрацита, каменного и бурого углей при различных вариантах КУ отражают диаграммы на Рисунке 2.2.3.

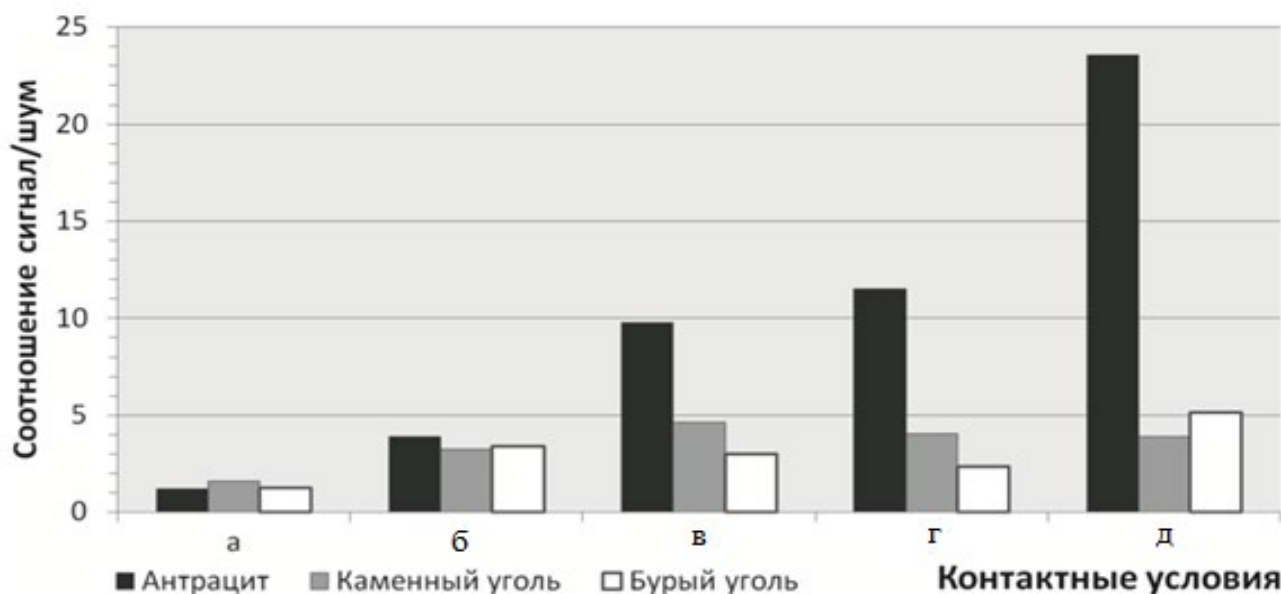


Рисунок 2.3.2 – Отношение С/Ш для антрацита, каменного и бурого углей при использовании для обеспечения КУ ПЭП S -волн с образцом: наждачной бумаги Р30 (а), Р60 (б), Р180 (в), Р400 (г) и высоковязкого раствора некристаллизованного полисахарида (д)

Обращает на себя внимание, что для антрацита указанное отношение с уменьшением зернистости наждачной бумаги зерна (соответственно увеличением количества зерен на единицу площади) постоянно растет, увеличиваясь более чем на порядок при переходе от Р30 к Р400. Для каменного и бурого углей соответствующая зависимость не столь однозначна. В первом случае имеется экстремум при Р180, а во втором при Р60.

Хотя по сравнению с медом применение наждачной бумаги в качестве контактной среды между ПЭП S -волн и образцами угля обеспечивает меньшее отношение С/Ш, однако оно минимизирует влияние процесса УЗ измерений на

акустические свойства ОК и обеспечивает постоянство соответствующих контактных условий. Отмеченное наглядно иллюстрируется полученными на образце антрацита и представленными на Рисунке 2.3.3 акустополяриграммами. Последние представляют собой кривые, отражающие зависимости амплитуды принятых УЗ сигналов поперечных волн от угла поворота образцов вокруг своей оси. Получение акустополяриграмм осуществлялось с использованием представленной на Рисунке 2.2.1 лабораторной установки. При этом угол поворота образца изменялся дискретно с шагом 30° .

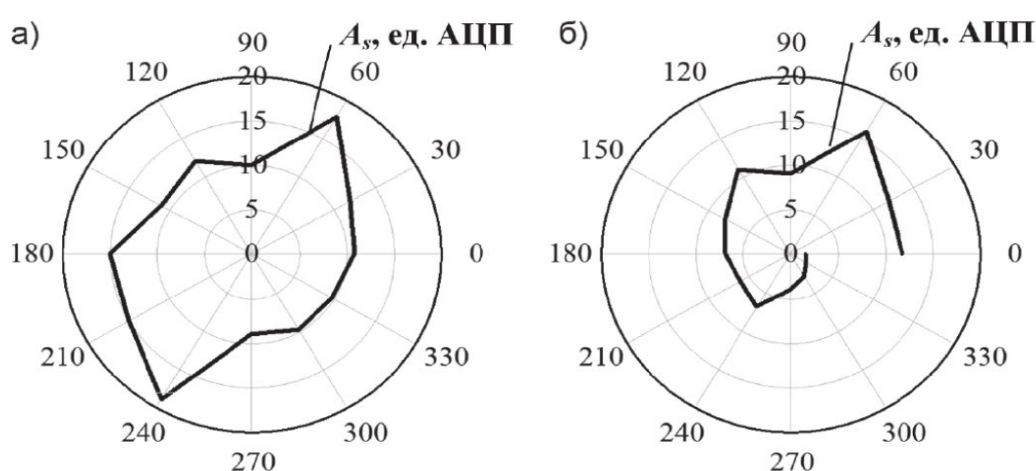


Рисунок 2.3.3 – Зависимость A_s от угла поворота образца при использовании в качестве контактной среды наждачной бумаги (Р400) (а) и высоковязкого раствора некристаллизованного полисахарида (б)

На каждом следующем шаге измерений прижимное давление ПЭП к образцу по возможности поддерживалось постоянным. Очевидно, что в случае постоянства КУ на каждом шаге поворота образца и отсутствия влияния контактной среды на его акустические свойства акустополяриграмма должна представлять собой замкнутую кривую.

Другими словами, значения параметра A_s , полученные при углах 0° и 360° должны совпадать. Как видно из Рисунок 2.2.4, а, при использовании в качестве контактной среды наждачной бумаги (Р400) такое совпадение действительно имеет место. В то же время, когда роль контактной среды выполняет медь, $A_s(0^\circ) \neq A_s(360^\circ)$ и акустополяриграмма оказывается разомкнутой.

Проведенные исследования свидетельствуют о наличии ряда особенностей использования поперечных волн для оценки свойств и состояния горных пород ультразвуковым методом на образцах. Для хрупких трещиноватых пород (таких как уголь) необходимое для эффективного ввода и приема упругих волн использование жидких контактных сред приводит к постепенному изменению свойств поверхностного слоя образца. Это искажает результаты проведения многократных ультразвуковых измерений, особенно при наличии внешних воздействий на образец.

Для решения задачи обеспечения эффективных контактных условий акустических преобразователей с образцами угля целесообразно вместо вязких контактных сред использовать наждачную бумагу. Причем для более прочных углей, таких как антрацит, предпочтительнее использовать абразив наименьшей крупности (P400, по ISO 6344), а для менее прочных наилучшие результаты достигаются при крупности P60—P180. В целом, по сравнению с некристаллизующимися полисахаридами, использование обеспечиваемого наждачной бумагой сухого контакта приводит к снижению амплитуды регистрируемых поперечных волн, однако соотношение сигнал/шум оказывается достаточным для их надежной регистрации. При этом подобные контактные условия не повреждают образец и позволяют проводить многократные измерения, в том числе при циклическом изменении температурных воздействий.

2.4 Использование продольных колебаний при оценке степени нарушенности углей под влиянием ЦЗО

Комплект оборудования для изучения влияния циклического низкотемпературного воздействия на спектральные характеристики продольных волн в образцах угля состоит из лабораторного стенда ультразвуковых испытаний (Рисунок 2.4.1) и многофункциональной климатической камеры «КТХВ-150» (Рисунок 2.2.2).

Акустические преобразователи продольных волн, используемые для прозвучивания, имеют центральную частоту $f = 150$ кГц. Передача энергии упругих

колебаний на границах «преобразователь-образец» осуществлялась без использования контактных жидкостей для исключения их влияния на параметры сигнала при переходе через температуру замерзания. Дополнительно качество контакта обеспечивалась струбиной, плотно прижимающей преобразователи к противоположным граням образца. В качестве акустической развязки использовался войлок толщиной 10 мм. На излучающий преобразователь подавался сигнал с генератора импульсов амплитудой 300 В. Сигнал, прошедший через образец, поступал с приемного преобразователя на вход аналого-цифрового преобразователя Е20-10 с частотой дискретизации 5 МГц, подключенного к персональному компьютеру. Длина записи составляла 4096 отсчетов (820 мс).

Для контроля температуры использовались две термопары. Первая термопара закреплялась в просверленном до центра образца отверстии. Таким образом измерялась температура в центре образца. Следует отметить, что диаметр отверстия для термопары был много меньше длины волны используемых для зондирования упругих импульсов, что исключает его влияние на результаты прозвучивания. Вторая термопара располагалась вне образца и предназначалась для измерения температуры воздуха в камере.



Рисунок 2.4.1 – Схема лабораторного стенда (1 – термопара для измерения температуры внутри образца, 2 – термопара для измерения температуры воздуха в камере)

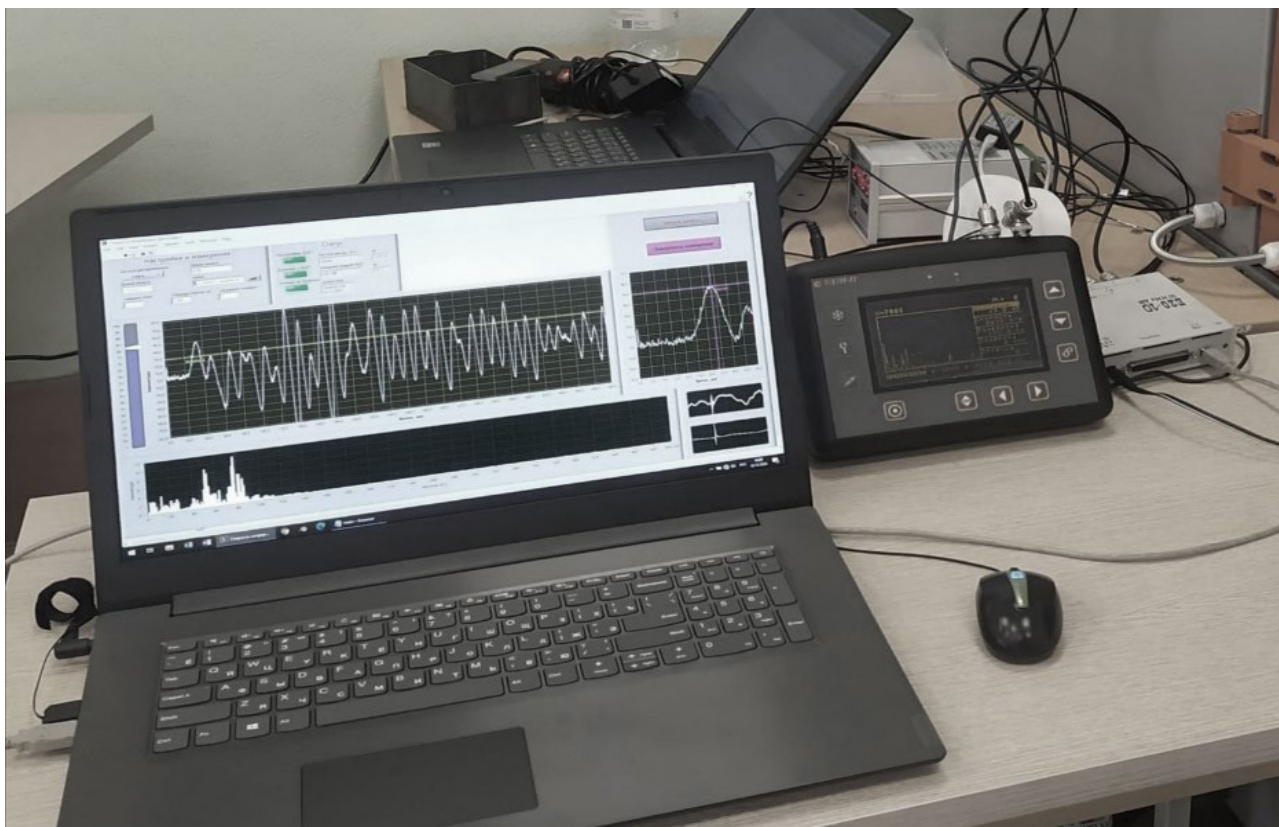


Рисунок 2.4.2 –Общий вид лабораторного стенда

Для циклического замораживания-оттаивания образцов углей была использована программируемая климатическая камера «КТХВ-150».

В исследованиях участвовали две группы образцов углей, отобранных на месторождениях Апсатского (каменный уголь, группа К) и Донецкого (антрацит, группа А) бассейнов. Параметры образцов и усредненные по группам характеристики углей приведены в таблице 2.1.1. Пробы угля были отобраны из угольных пластов вне зоны окисления. Сразу после извлечения из пласта образцы помещали в герметичный контейнер для предотвращения процессов окисления. Перед тестированием образцы оставляли на 1 день при комнатной температуре для удаления внешней влаги. Подготовка образцов заключалась в шлифовании их поверхности до образования двух параллельных граней. Высота всех образцов составляла 50 мм.

Испытания производились при разных уровнях насыщения образцов водой. Образцы К1, К2, А1, А2 испытывались в сухом состоянии. Образцы К3, К4, А3, А4 перед испытанием помещались в воду на 24 часа. Непосредственно перед помещением в климатическую камеру излишки влаги с поверхности образцов удалялись.

Образцы K5, K6, A5, A6 также насыщались водой на протяжении 24 часов, после чего осуществлялась их сушка в вакуумной камере до сокращения уровня влаги до 50% от максимально достигнутого. Определение уровня насыщения водой производилось по разнице веса образца до и после насыщения водой.

Образцы помещались в климатическую камеру «КТХВ-150», где в них закреплялись термопары, а на их поверхностях надежно фиксировались акустические преобразователи. Далее производилось их циклическое замораживание-оттаивание с амплитудой $T = +20^{\circ}\text{C} \div -20^{\circ}\text{C}$. Скорость замораживания/оттаивания составляла 2 град./мин. При достижении минимальной (максимальной) температуры образец выдерживался при этой температуре не менее 30 минут для достижения термического равновесия между его центром и поверхностью. Количество циклов замораживания-оттаивания составило 3. Ранее в [127] было показано, что наибольшее влияние на разрушение углей производят именно первые три цикла термического нагружения. На протяжении всего времени нахождения образца в камере производилось его непрерывное прозвучивание ультразвуковыми импульсами. Волновые формы сохранялись на жесткий диск компьютера каждые 5 секунд. Также каждые 5 секунд регистрировалась температура в камере и центре образца.

Уровень насыщения водой устанавливался по разнице массы до и после погружения в воду образцов.

Циклическое замораживание-оттаивание выполнялось с амплитудой $T = +20^{\circ}\text{C} \div -20^{\circ}\text{C}$. Количество циклов замораживания-оттаивания составило 3.

На протяжении времени нахождения образца в климатической камере выполнялось его непрерывное прозвучивание УЗ-импульсами. Каждые 5 секунд на компьютере выполнялось сохранение волновых форм ультразвукового сигнала на жесткий диск, а также регистрировалась температура в климатической камере и в центре образца с помощью термопарных датчиков.

Установление влияния ЦЗО на образец угля возможно с применением оценки изменения полной энергии E ультразвукового сигнала:

$$E = \int_0^{T_s} A^2(t) dt \quad (2.4.1)$$

где A — величина амплитуды сигнала в момент времени t ; T_s — длительность сигнала.

Снижение параметра E обычно свидетельствует о росте затухания ультразвука в среде на фоне роста количества и размеров дефектов.

Дополнительную информацию о характере возникающих в образцах нарушений может дать спектральная обработка зарегистрированных сигналов. Первым этапом спектральной обработки является построение амплитудных спектров сигналов из результатов вычисления действительной части быстрого преобразования Фурье. Далее из полученных данных формируется спектрограмма — изображение, показывающее изменение спектрального состава сигналов во времени.

Более детальный анализ можно провести при помощи оценки ширины спектра, сужение которого может свидетельствовать об образовании трещин. Такие изменения спектра связаны с тем, что трещины с акустической точки зрения, выступают в качестве фильтров нижних частот.

Особенностью спектрального анализа волновых форм ультразвуковых сигналов в образцах угля является получение спектров с несколькими локальными спектральными максимумами. В этом случае использование стандартных процедур для определения ширины спектра оказывается затруднительным. В настоящей работе для оценки ширины спектра предлагается использовать один из корреляционных параметров случайных процессов — интервал корреляции сигнала

$$\tau_k = \frac{1}{B(0)} \int_0^\infty |B(\tau)| d\tau \quad (2.4.2)$$

где $B(\tau)$ — автокорреляционная функция зарегистрированного сигнала.

Известно, что величина автокорреляционной функции τ_k , обратно пропорциональна эффективной ширине спектра сигнала Δf , следовательно увеличение автокорреляционной функции τ_k , свидетельствует о сужении спектра сигнала, снижение же τ_k характерно для увеличения эффективной ширины спектра сигнала:

$$\tau_k = \frac{1}{4\Delta f}. \quad (2.4.3)$$

2.5 Выводы

Применение сдвиговых волн связано с рядом сложностей, как на этапе их генерации, так и на этапах их ввода в контролируемую среду и приема из нее, что было установлено в рамках исследования в данной главе. Такие трудности, в первую очередь, связаны с особенностями работы с хрупкими, пористыми и трещиноватыми породами с большим затуханием упругих волн, такими, как уголь.

По результатам исследований, описанных в данной главе, были установлены оптимальные контактные условия на границе «преобразователь-образец» при ультразвуковом прозвучивании углей, подвергаемых циклическим низкотемпературным воздействиям.

По результатам эксперимента, описанного в главе, для обеспечения оптимальных контактных условий при прозвучивании образцов угля поперечными упругими волнами, предложено использование специализированных протекторов с нанесенным на них абразивом, размер зерна которого составляет: 35-75 мкм для антрацита и каменного угля, 75-250 мкм для бурого угля.

Установлено, что такой способ обеспечения контактных условий позволяет устойчиво регистрировать сдвиговые колебания в образцах углей и не приводит к их проникновению в приповерхностный слой образца и постепенному изменению его акустических свойств и поврежденности.

В данной главе также представлено обоснование возможных и выборе наиболее эффективных способов оценки степени выветривания под воздействием циклического замораживания-оттаивания на образцы угля различных видов, и на основании данных исследования была выполнена разработка специализированного лабораторного оборудования для проведения ультразвуковых исследований воздействия циклического замораживания-оттаивания на различные виды углей.

3 ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦЗО НА СВОЙСВА УГЛЕЙ РАЗНОГО ВИДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ АКТИВНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПРОЗВУЧИВАНИЯ

3.1 Исследование влияния количества циклов ЦЗО на степень нарушенности углей с использованием поперечных волн

3.1.1 Влияние циклического замораживания-оттаивания на амплитуды и скорости поперечных волн

В результате лабораторных испытаний для каждого образца угля были сформированы матрицы значений V_s и A_s для различных значений θ и номеров циклов замораживания-оттаивания. Указанные матрицы можно представить в виде полярных диаграмм. Пример полученных полярных диаграмм для образцов угля трех видов представлен на рисунке 3.1.1.

Из рисунка 3.1.1. видно, что наиболее значительные изменения акустических информативных параметров наблюдаются при использовании амплитуды поперечных волн. Так, для направления прозвучивания $\theta = 60^\circ / 240^\circ$ величина A_s с увеличением числа циклов замораживания-оттаивания до 15 уменьшается на 79%, в то время величина V_s изменяется только на 16% (после 15 циклов). Повышенная чувствительность s-волн к протяженным дефектам, таким как трещины, является общепризнанным фактом и часто используется для изучения нарушенности различных сред на разных масштабных уровнях [128, 129].

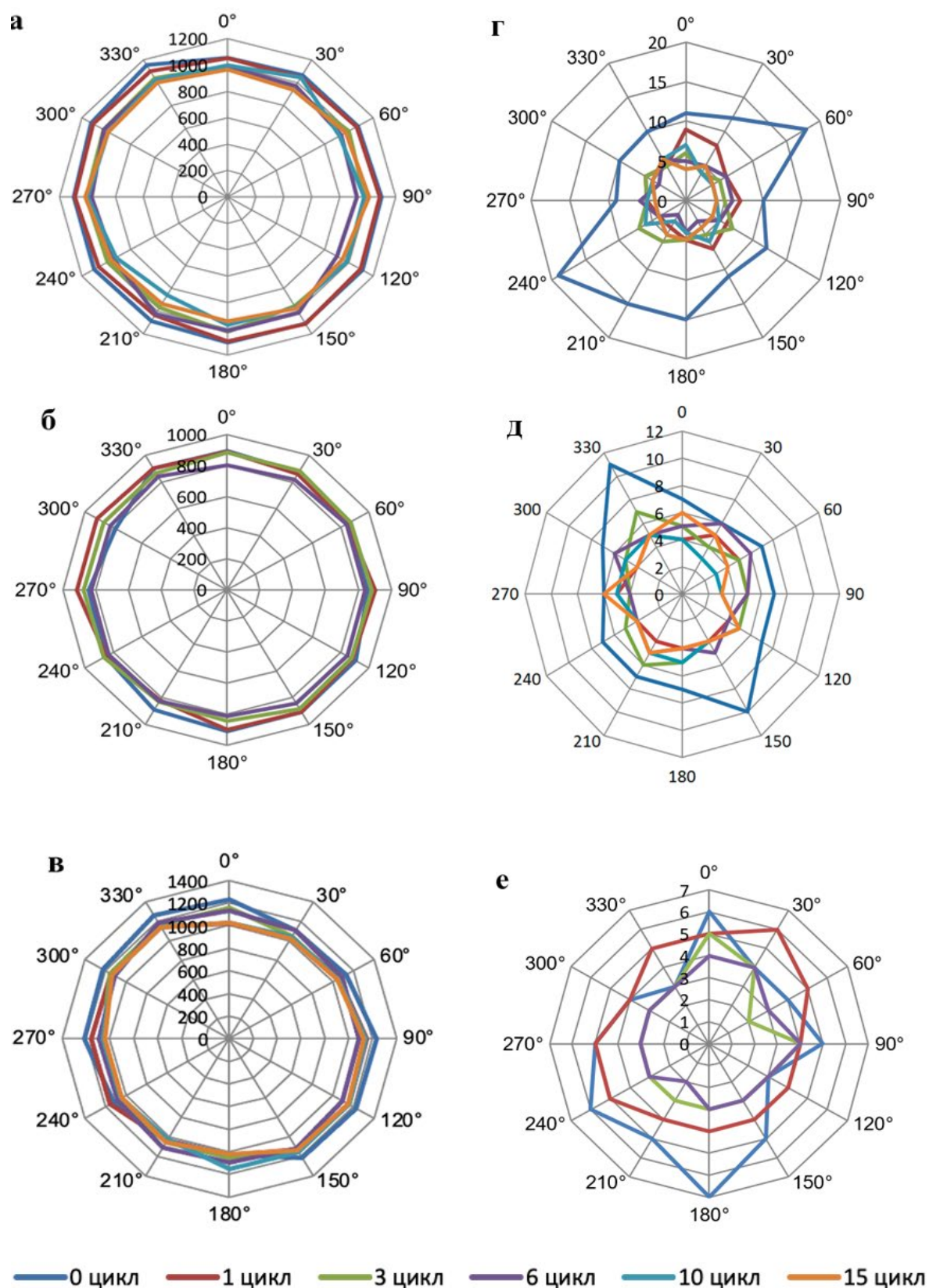


Рисунок 3.1.1 – Полярные диаграммы скорости поперечной волны для образцов антрацита (а), каменного (б), бурого (в) углей, полярные диаграммы амплитуды поперечной волны для образцов антрацита (г), каменного (д), бурого (е) углей

Значительно большее изменение величины A_s по сравнению с V_s наблюдалось на всех исследованных образцах трех групп. Ввиду высокой чувствительности параметра A_s к динамике структурной поврежденности образцов угля в настоящей работе именно этот параметр будет использоваться как основной. На Рисунке 3.1.2 представлены примеры полярных диаграмм для образцов бурого и каменного углей.

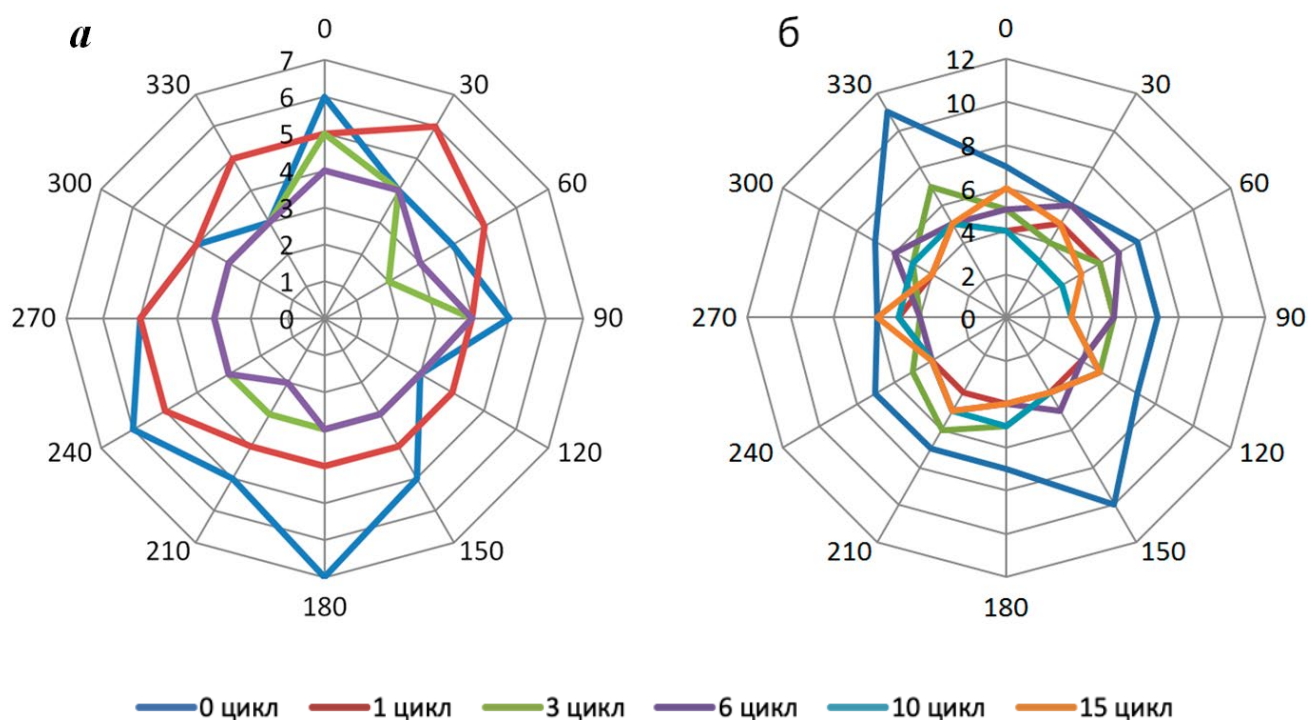


Рисунок 3.1.2 – Полярные диаграмм для образцов бурого (а) и каменного углей (б)

Образцы группы бурых углей отличались наибольшим уровнем исходной нарушенности и наименьшей прочностью. Поскольку все образцы указанной группы разрушились между шестым и десятым циклом, поэтому в работе приводятся результаты измерений после 0, 1, 3 и 6 циклов.

Из рисунка 3.1.2 видно, что с увеличением числа циклов замораживания-оттаивания площадь, ограниченная полярной диаграммой, уменьшается. Это связано с влиянием роста трещин на параметры затухания поперечных волн. Таким образом, по величине такой площади S можно косвенно судить об общем уровне нарушений в образце и динамике его изменения в процессе замораживания-оттаивания.

На Рисунке 3.1.3 приведены графики расчетных значений параметра S в функции от числа циклов низкотемпературного воздействия для различных типов исследованных углей.

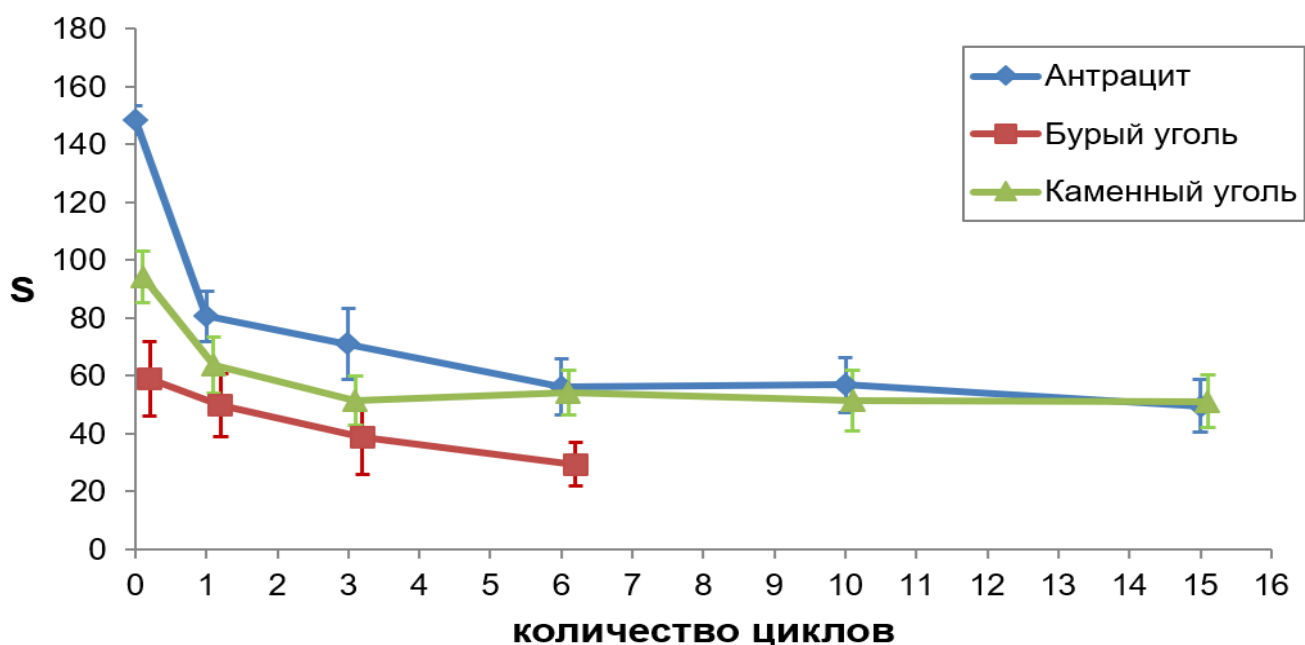


Рисунок 3.1.3 – Графики расчетных значений параметра S в функции от числа циклов низкотемпературного воздействия для различных типов исследованных углей.

Из результатов экспериментов также видно, что во всех образцах наблюдается исходная анизотропия акустических свойств, изменяющаяся по мере роста количества циклов замораживания-оттаивания. На Рисунке 3.1.4 представлено изменение коэффициента анизотропии K_a , рассчитанного как отношение максимального значения A_s к минимальному.

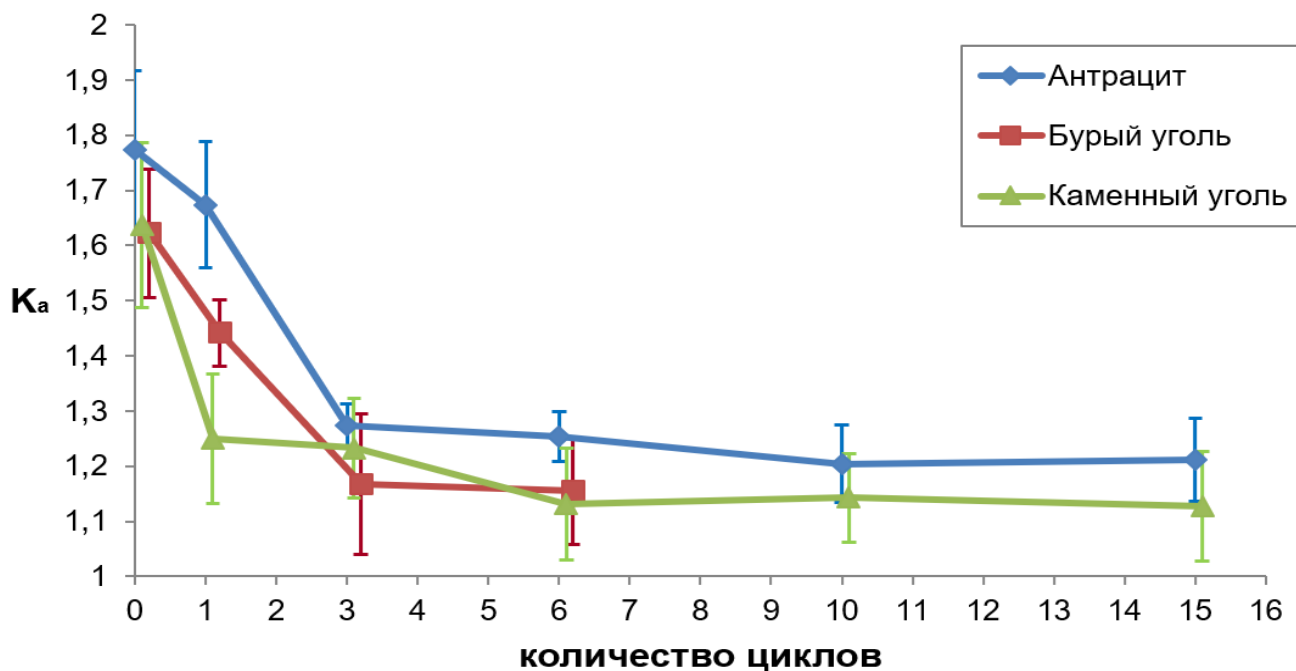


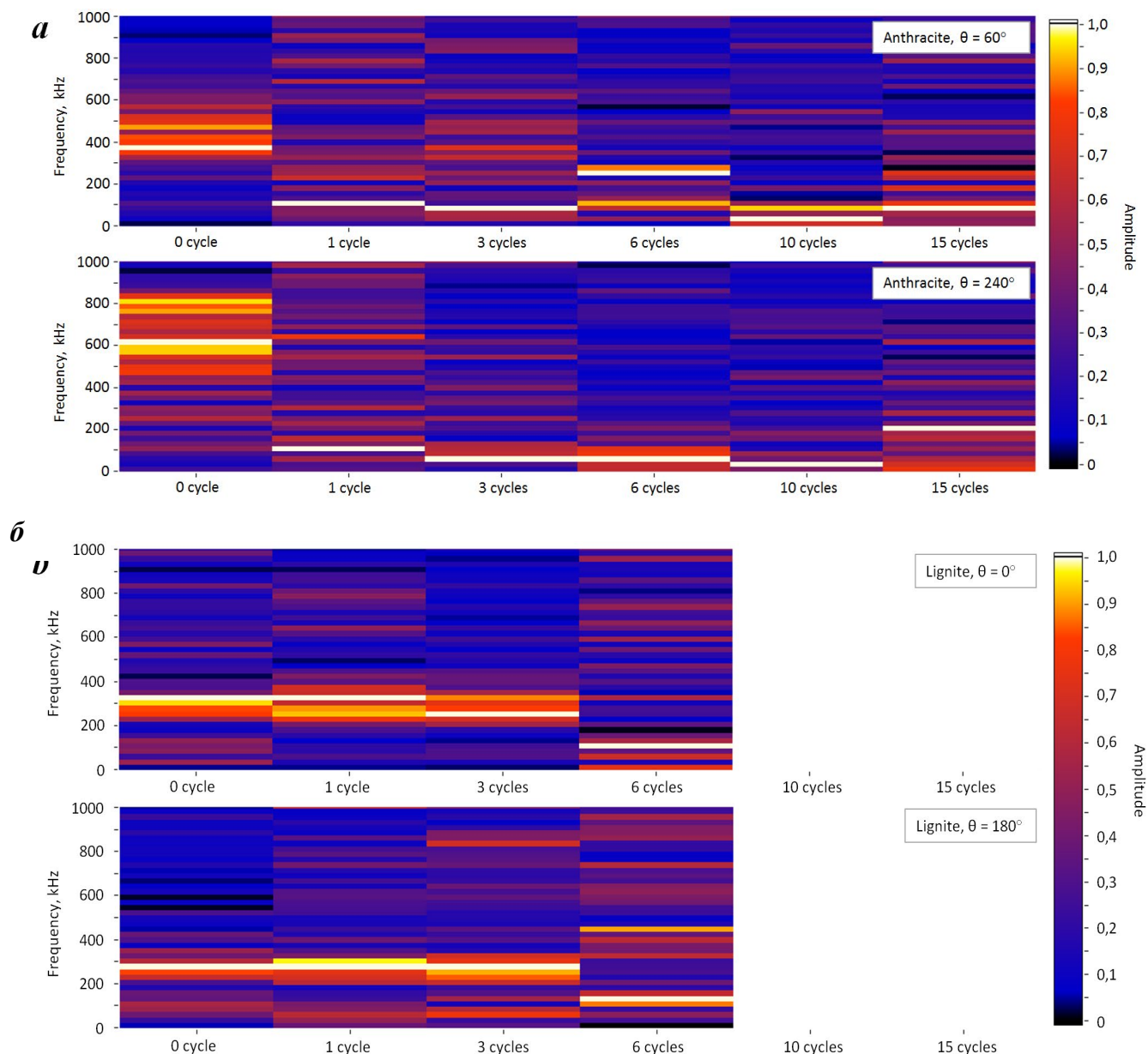
Рисунок 3.1.4 – Зависимость коэффициента анизотропии K_a от роста числа циклов замораживания-оттаивания

3.1.2 Спектральный анализ акустических сигналов

Как уже отмечалось ранее, при применении ультразвуковых методов для оценки степени дефектности различных материалов чаще всего используются такие информативные параметры, как скорость и амплитуда продольных и, реже, поперечных волн. Дополнительную информацию о степени и характере нарушений в образце, особенно о ее динамике возможно получить при использовании спектрального анализа принятых сигналов [130, 131]. Чаще всего при этом в качестве информативных параметров используются значения ширины спектра ΔF , а также частота спектрального максимума F_{max} . Так, в [132] отмечается снижение указанных параметров при приближении к разрушению горной породы.

В настоящей работе записанные сигналы также подвергались спектральной обработке. Наибольший интерес в данном случае представляют сигналы, полученные вдоль направления основной оси анизотропии. Спектральный анализ

заклучался в построении спектрограмм сигналов, где по горизонтальной оси откладывались номера циклов, по вертикальной – частоты акустических сигналов, а цветом кодируются амплитуды. Спектрограммы получены путем последовательного построения нормированных спектров сигналов, полученных с помощью быстрого преобразования Фурье. На Рисунке 3.1.5 представлены примеры спектрограмм для всех трех типов исследованных углей.



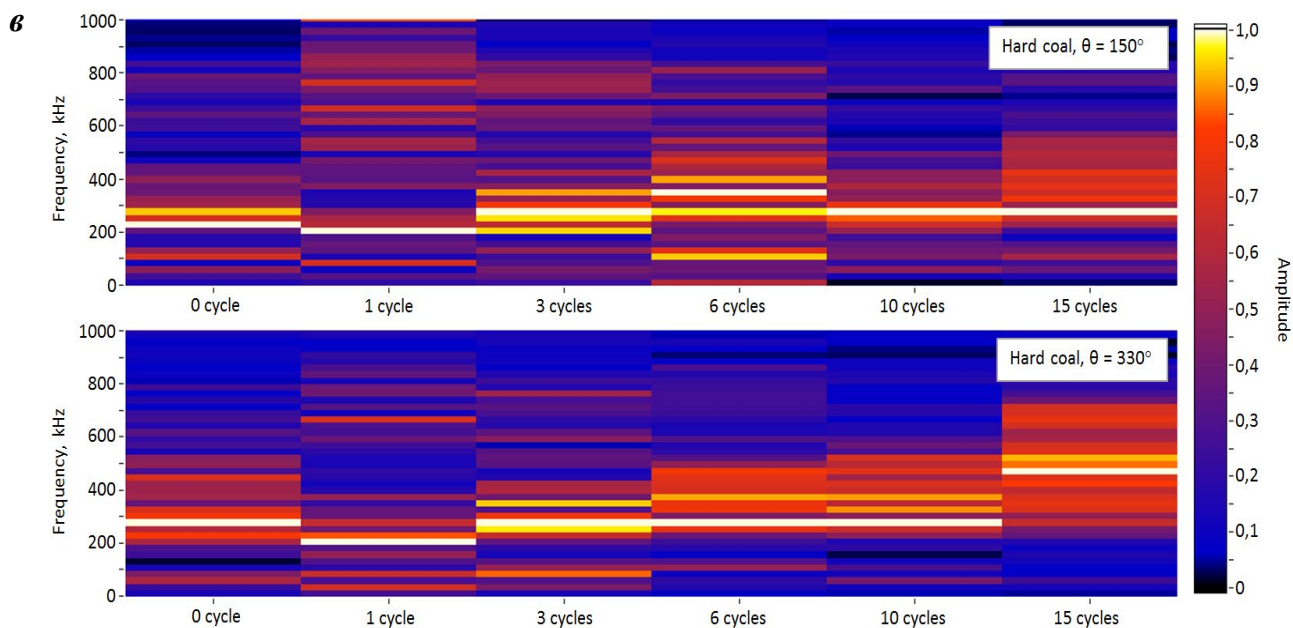


Рисунок 3.1.5 – Нормированные спектрограммы сигналов, полученные вдоль главной оси анизотропии в образцах антрацита (а), бурого (б), каменного (в) углей

При исследовании трещиноватых сред особый интерес представляет относительное изменение ширины спектра сигнала. Такой параметр крайне чувствителен к протяженности и раскрытию трещин. Сигнал, проходя через трещину, являющуюся с акустической точки зрения фильтром низких частот, претерпевает существенные изменения. Как правило, такие изменения заключаются в потере части высокочастотных спектральных составляющих и общем сужении спектра [133]. Для оценки относительного изменения ширины спектра в настоящей работе предлагается использовать интервал корреляции τ_k , вычисляемый из выражения (4).

Параметр τ_k показывает величину временного интервала, на котором в сигнале остаются корреляционные связи с самим собой. Для шумового сигнала $\tau_k \rightarrow 0$, а для детерминированного сигнала $\tau_k \rightarrow \infty$. Таким образом, τ_k обратно пропорционален ширине спектра сигнала. На рисунке 3.1.6 представлены результаты расчета τ_k для сигналов, полученных в направлении основной оси анизотропии образцов всех трех групп.

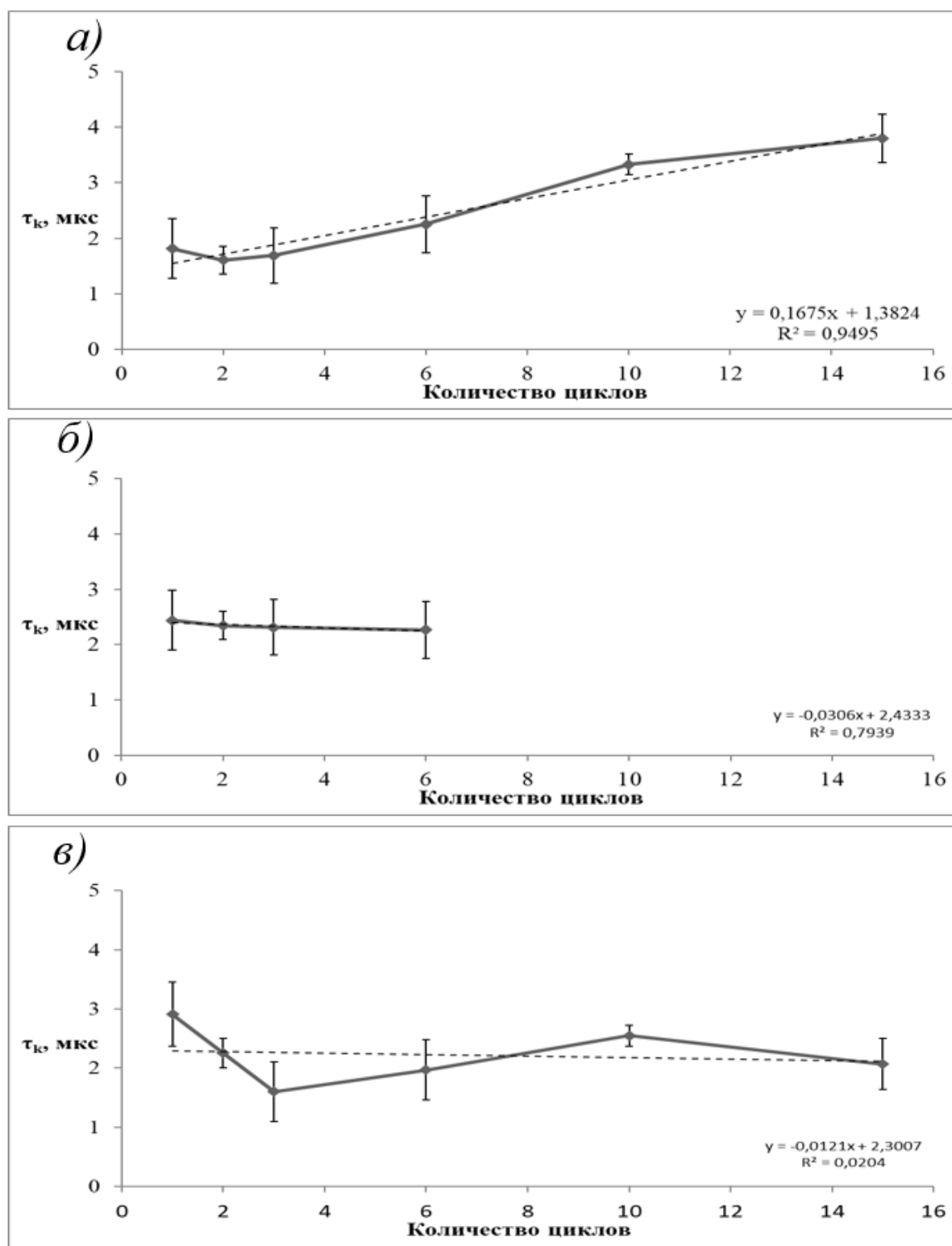


Рисунок 3.1.6 – Зависимость сигналов τ_k полученных вдоль главной оси анизотропии, от числа циклов замораживания-оттаивания для образцов антрацита (а), бурого угля (б) и каменного угля (в)

По результатам выполненных исследований установлено, что наибольшее изменение A_s происходит после первого цикла замораживания-оттаивания. Разница между значениями S в нулевом и после первого цикла замораживания-оттаивания составляет более 100%. Дальнейшее снижение оказывается значительно более плавным. К 15 циклу величина площади полярной диаграммы снижается дополнительно еще на 25%. Подобная закономерность в меньшей степени наблюдается в образцах каменного угля. После первого цикла происходит снижение S на 32%, далее величина площади полярной диаграммы практически не изменяется. В образцах бурого угля резкого снижения площади S после первого цикла замораживания-оттаивания не наблюдается.

Как уже было отмечено в большинстве работ, исследующих влияние циклического замораживания-оттаивания на механические свойства углей, для анализа используется скорость продольной волны. Так в [134] зависимость V_p хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией. Значительное снижение скорости наблюдается вплоть до 10 цикла, что, в некоторой степени, не согласуется с результатами, представленными в этой работе. Однако следует учитывать, что характер взаимодействия поперечной волны с трещиноватой средой отличается от такового для продольной. Снижение скорости р-волны при прохождении сигнала через трещину происходит за счет распространения колебаний в среде заполнителя трещины со значительно меньшей скоростью. Однако при малом раскрытии трещин суммарная протяженность участков с заниженными скоростями оказывается сравнительно невысокой, а общее значение V_p в образце снижается незначительно. С другой стороны, снижение амплитуды поперечной волны происходит из-за значительного снижения величины модуля сдвига на берегах трещины. Из-за этого даже трещины с малым раскрытием приводят к значительному снижению A_s . При этом увеличение раскрытия трещины не приводит к значительному изменению амплитуды S -волны.

Таким образом, можно утверждать, что величина V_p чувствительна к участкам породы, в которых по разным причинам скорость оказывается ниже. К таким участкам можно отнести несомкнутые трещины и поры (замкнутые и незамкнутые). В то же время величина A_s наиболее чувствительна к факту наличия трещин,

ориентированных перпендикулярно к плоскости поляризации. Снижение A_s из-за изменения размера пор маловероятно из-за выбранного частотного диапазона (длина волны много больше типичных размеров пор) и их изометричной структуры.

Сравнительные исследования [135] указывают на то, что антрациту присуща наибольшая прочность и однородность, а также низкий уровень исходной нарушенности. С переходом на каменный уголь механические характеристики снижаются. Бурый уголь чаще всего обладает наименьшей прочностью и высокой исходной нарушенностью, что часто приводит к невозможности изготовления стандартных образцов для механических испытаний.

Вышесказанное обосновывает полученные в результате эксперимента закономерности. Так, наибольшее падение S после первого цикла при исследовании образцов антрацита соответствует образованию трещин, предположительно сомкнутых. Резкое падение обусловлено наличием в исходном образце сильных упругих связей и их разрушением после термического воздействия. В каменном угле на фоне меньшего количества исходных упругих связей падение S выражено менее отчетливо. Для наиболее нарушенного угля – бурого – резкого падения S не наблюдается ввиду высокого уровня исходной нарушенности. Это также подтверждается тем, что значение S в нулевом цикле для бурого угля более чем в два раза ниже, чем для антрацита. Для характеристики склонности углей к разрушению под влиянием циклического замораживания-оттаивания можно использовать коэффициент устойчивости к ЦЗО $k_{c.d.}$.

$$k_{c.d.} = \frac{S^*}{S_0}, \quad (3.1.1)$$

где S^* - площадь полярной диаграммы на цикле, после которого начинается вымораживание параметра S , S_0 – площадь полярной диаграммы в нулевом цикле. Коэффициент $k_{c.d.}$ изменяется в диапазоне от 0 до 1, при этом 1 означает абсолютное отсутствие склонности к повреждению, 0 – сильная склонность к повреждению. Для соотношения между 3 и 0 циклом значения $k_{c.d.}$ для антрацита, бурого и каменного угля составляют 0.434, 0.684 и 0.674 соответственно.

Это означает, что наиболее плотные и прочные угли с прочными внутренними связями наиболее склонны к поврежденности в условиях неизменного уровня влажности.

Естественная анизотропия в углях обусловлена их генезисом и отчетливо проявляется на нулевом цикле исследований. Значения K_a для антрацита, каменного угля и бурого угля равны 1.762, 1.625 и 1.620 соответственно. Снижение коэффициента анизотропии K_a проявляется примерно в равной степени для всех типов исследованных углей, достигая минимальных значений после 3 – 6 циклов. По всей видимости, образование трещин в процессе замораживания-оттаивания происходит во всех направлениях, однако наибольший прирост затухания S -волн происходит в направлении естественной исходной анизотропии. Направление, перпендикулярное главной оси анизотропии, характеризуется слабыми связями между структурными элементами, поэтому существенного изменения затухания поперечных волн вдоль него не наблюдается. Это предположение также подтверждается закономерностями спада параметра S , описанными выше. Именно образцы антрацита, обладая наибольшей прочностью и плотностью (а, следовательно, наиболее сильными исходными внутренними связями), подвергаются наибольшему деструктивному воздействию после первого цикла замораживания-оттаивания.

Спектральный анализ ультразвуковых сигналов при оценке нарушенности горных пород, подвергаемых циклическому замораживанию-оттаиванию, позволяет получить дополнительную информацию о характере разрушения образцов. Так в работе [136] предпринимались попытки анализа спектров продольной волны, прошедшей через образцы красного песчаника, подвергнутых циклическому низкотемпературному воздействию. По результатам спектрального анализа было установлено, что термическое воздействие приводит к постепенному увеличению амплитуд низкочастотной области спектра и одновременному снижению амплитуд высокочастотной области. При этом значительные изменения наблюдались после 10 цикла замораживания-оттаивания. Аналогичные закономерности наблюдаются при анализе спектров акустических сигналов в исследованных углях. Наиболее значительное изменение спектрального состава принятых сигналов проявляется после

первого цикла в образцах антрацита. В этом случае частота максимума спектра f_{max} резко падает с 600 кГц до 100 кГц. Далее f_{max} претерпевает незначительные изменения. Это объясняется образованием новых трещин в плоскости, ортогональной плоскости поляризации S -волны. Высокая чувствительность сдвиговой волны к подобным трещинам обуславливает более резкое падение f_{max} по сравнению с продольными волнами. В более нарушенных образцах бурого и каменного углей существенного изменения спектрального состава S -волн не наблюдается. При этом следует отметить изначально низкую частоту максимума спектра, которая варьируется от 200 до 300 кГц для обоих типов углей. Излучение S -волны производилось широкополосными преобразователями с центральной частотой 600 кГц. «Потеря» сигналом значительной части верхних частот свидетельствует о наличии в образцах трещин, расположенных ортогонально оси анизотропии, а также об общем высоком уровне изначальной нарушенности.

Косвенный анализ ширины спектра на основе оценки интервала корреляции подтверждает выводы, сделанные выше. Существенные изменения τ_k наблюдаются только при исследовании образцов антрацита. Рост τ_k свидетельствует об увеличении степени детерминированности сигнала, т.е. сужения его спектра. Следует, однако, отметить более плавный рост τ_k отстающий от резкого падения f_{max} .

3.1.3 Реверберационный метод анализа акустического сигнала

Одним из альтернативных способов обработки зарегистрированных УЗ сигналов является реверберационный метод [137] проходящих волн. Он включает измерение времени полного затухания упругого импульса в определенном объеме исследуемого геоматериала. Явление реверберации упругих волн связано с их многократным отражением от границ, интерференцией, преобразованием, затуханием и другими волновыми явлениями, в результате чего форма и длительность огибающей ультразвукового импульса будут зависеть от распределения структурных неоднородностей.

Реверберационный метод, очевидно, накладывает ограничения на частоту посылки ультразвукового импульса, которая обычно не превышает 50 Гц. В результате за время от одной посылки до другой гарантированно затухают все виды волн, возникающие в контролируемом объеме под воздействием одиночного импульса.

Реверберационный метод применяется преимущественно для выявления структурных неоднородностей в образцах геоматериалов. При равномерной ненарушенной структуре реверберационная кривая характеризуется четким быстро нарастающим передним фронтом и экспоненциальной огибающей амплитуд.

Наличие множественных макроэффетков приводит к снижению уровня первых периодов кривой реверберации и смещению во времени ее максимальной амплитуды.

Существует множество способов построения огибающей сигнала. Одним из наиболее распространенных способов является использование преобразования Гильберта [138].

Для этого вводится понятие аналитического сигнала $z_s(t)$ – формы представления сигнала в виде двух комплексно сопряженных компонент в соответствии с

$$z_s(t) = S(t) + j\hat{S}(t), \quad (3.1.2)$$

где $S(t)$ – исходный сигнал, $\hat{S}(t)$ – сопряженный сигнал, получаемый с помощью преобразования Гильберта

$$\hat{S}(t) = S(t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi}. \quad (3.1.3)$$

В данном случае сопряженный сигнал является копией исходного сигнала, со смещенной на $\pi/2$ фазой. Построение огибающей $U_S(t)$ было реализовано путем вычисления модуля аналитического сигнала

$$U_S(t) = |z_S(t)| = \sqrt{S^2(t) + \hat{S}^2(t)}, \quad (3.1.4)$$

На рисунке 3.1.7 представлен пример волновой формы, полученной при прозвучивании образца К2 в климатической камере. В результате применения выражений (1) - (3) были получены сопряженный сигнал и огибающая. Из рисунка 3.1.7 видно, что огибающая, полученная в результате вычисления модуля аналитического сигнала, оказывается достаточно «изрезанной», однозначное нахождение ее максимума является затруднительным. Для удобства было произведено сглаживание исходной огибающей по алгоритму скользящего среднего в соответствии с

$$\bar{U}_S(t) = \frac{1}{p} \sum_{j=t-m}^{t+m} U_{Sj}, \quad (3.1.5)$$

где p – размер окна (брался равным 5% от длительности сигнала), $m = (p-1)/2$. Результат применения (4) также приведен на рисунке 3.1.7.

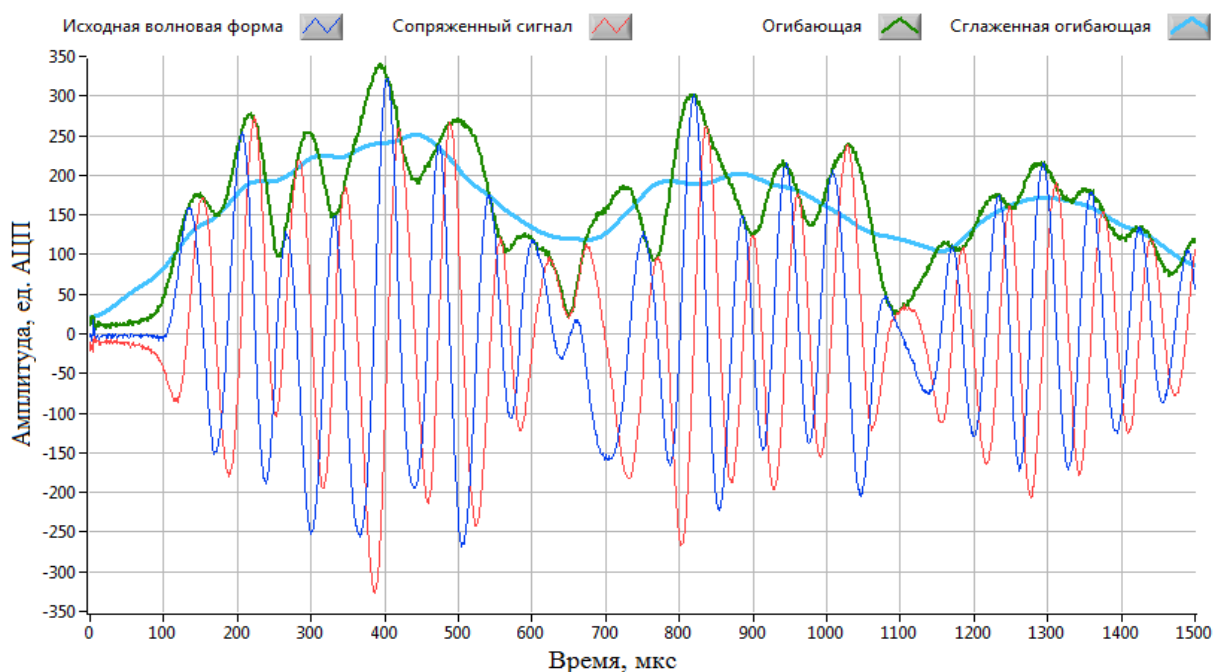


Рисунок 3.1.7 – Исходный сигнал и этапы вычисления огибающей сигнала

Для наиболее полного анализа были вычислены сплаженный огибающие всех 2309 волновых форм, зарегистрированных в процессе ЦЗО образца К2. На рисунке 3.1.8 представлен результат такого вычисления. Из рисунка 3.1.8 видно, что существенных изменений положения максимума огибающей в зоне положительных амплитуд не наблюдается. В зоне отрицательных амплитуд напротив, наблюдается смещение максимума из зоны 100 мкс в первом цикле в зону 300 мкс во втором и третьем цикле. Это свидетельствует о возникновении необратимого дефектообразования уже после первого цикла замораживания-оттаивания в рассматриваемом образце.

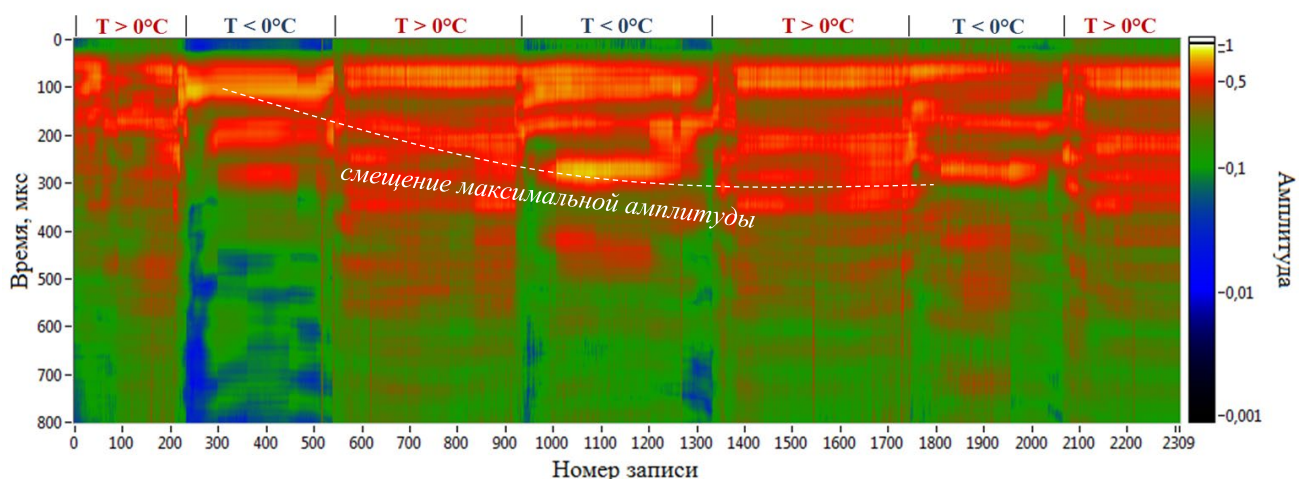


Рисунок 3.1.8 – Результат вычисления огибающих волновых форм ультразвуковых импульсов

Для количественной оценки изменений структуры угля, ведущей к потере прочности был использован критерий, названный SWF (stress wave factor): Амплитудный способ.

Амплитудный способ SWF предполагает, что значение амплитуды изменяется в зависимости от изменения структуры исследуемого материала. Пиковая амплитуда в большинстве материалов изменяется обратно пропорционально затуханию и обеспечивает эффективную основу для определения SWF [139]. SWF может быть определен по размаху колебания (разнице между максимальной и минимальной амплитудой сигнала).

Определение критерия SWF оказалось полезным для оценки накопления повреждений в образцах, подвергнутых циклическому низкотемпературному воздействию. В результате циклического низкотемпературного воздействия произошло сокращение критерия SWF в 1,8 раза между углем до ЦЗО и после третьего цикла ЦЗО.

3.2 Исследование влияние влаги на изменение нарушенности углей при их ЦЗО с использованием продольных волн.

3.2.1 Спектральный анализ акустических сигналов

В результате испытаний для каждого образца формировалась база волновых форм и синхронизированная с ней база значений температур. Обработка сигналов заключалась в вычислении их спектров с применением быстрого преобразования Фурье. Из всех полученных спектров формировалась спектрограмма – трехмерное изображение, показывающее изменение спектра сигнала во времени. Пример спектрограмм для образцов каменного угля и антрацита приведен на рисунках 3.2.1-3.2.6. Для удобства анализа на спектрограмму нанесены графики изменения температуры воздуха в камере и в центре образца.

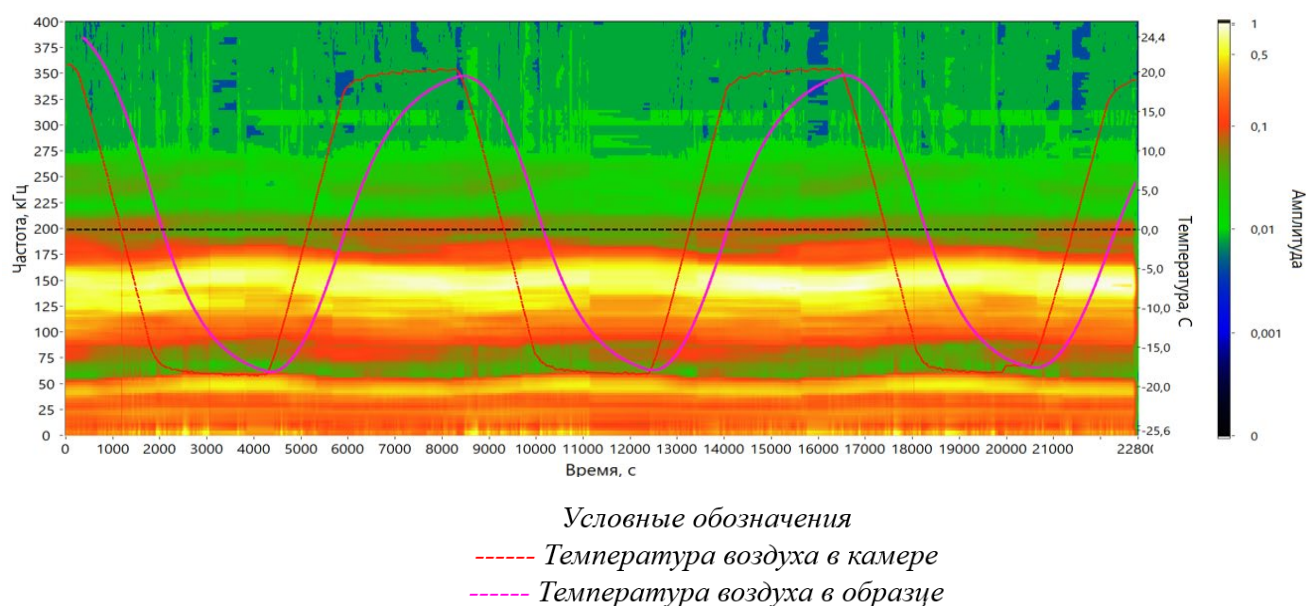


Рисунок 3.2.1 – Пример спектрограммы, полученной для неводонасыщенных образцов ($W^a \rightarrow 0\%$) каменного угля (черной штриховой линией отмечен уровень температуры 0°C)

Более существенные изменения спектров наблюдаются для образцов, частично или полностью насыщенных водой. На Рисунке 3.2.2, 3.2.4 приведена

спектрограмма для образца с частичным водонасыщением, а на Рисунке 3.2.3, 3.2.6 – для образцов с максимальным водонасыщением.

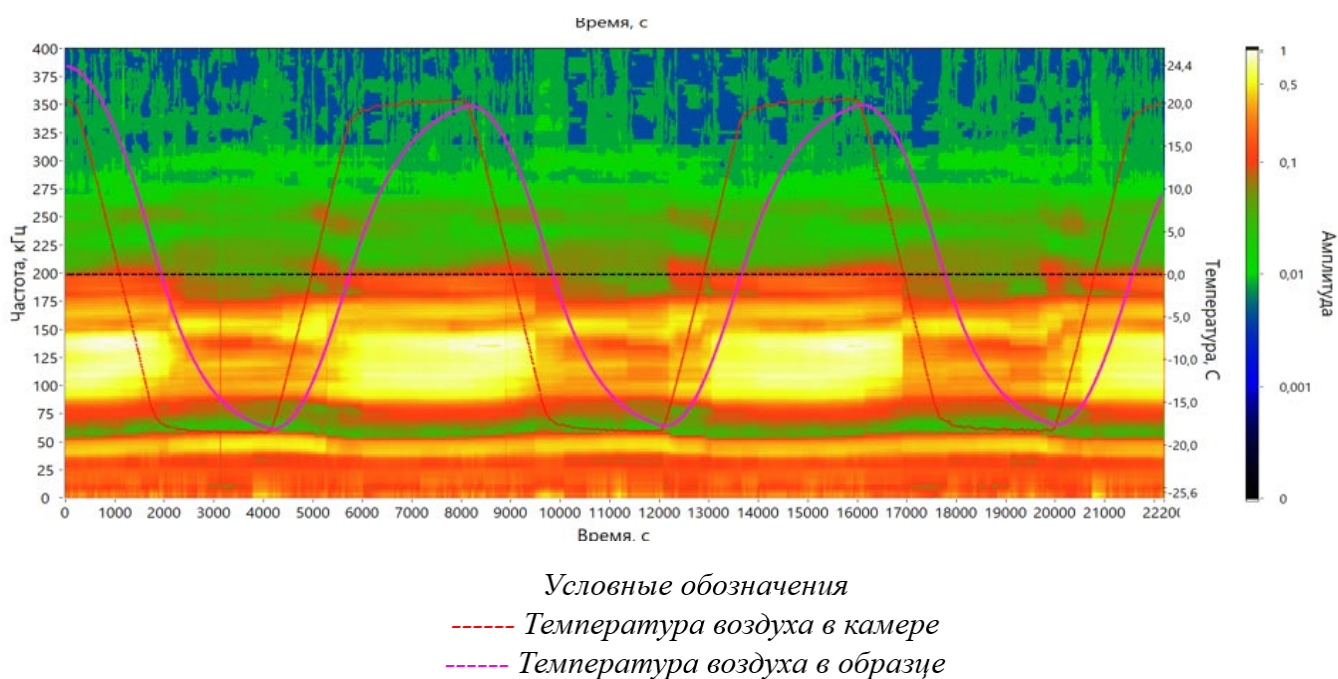


Рисунок 3.2.2 – Пример спектрограммы, полученной для частично водонасыщенных образцов ($W^a \approx 1\%$) каменного угля

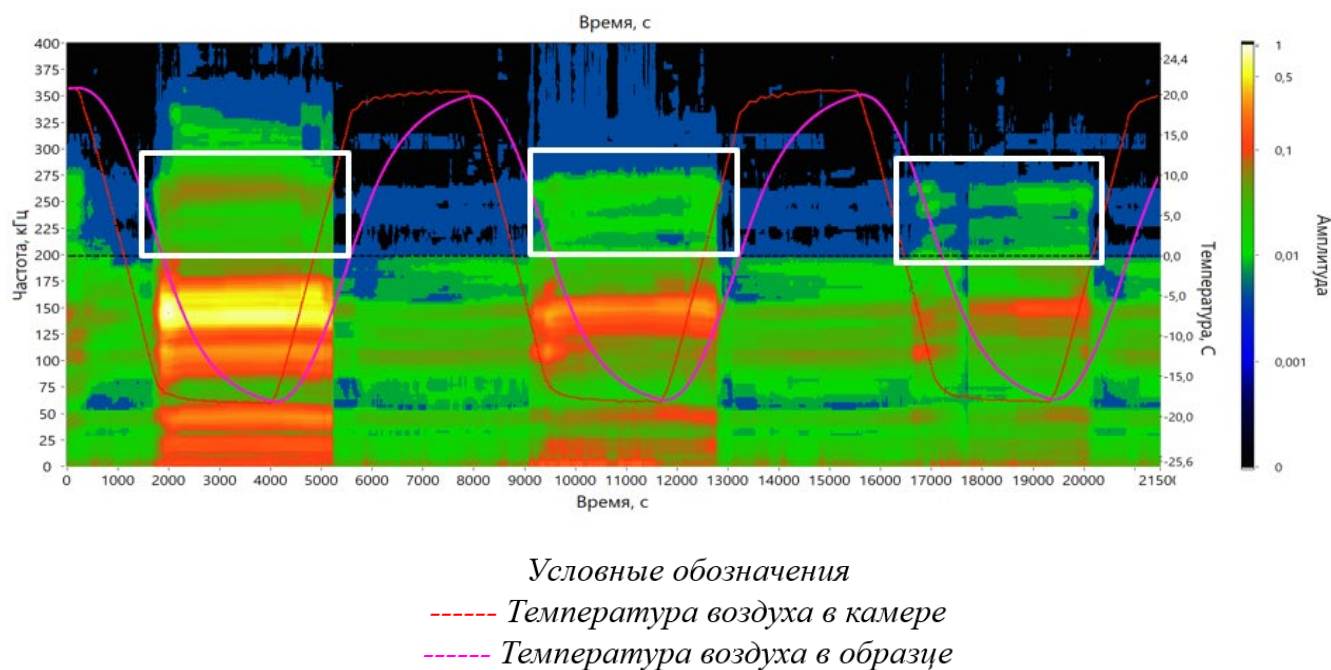
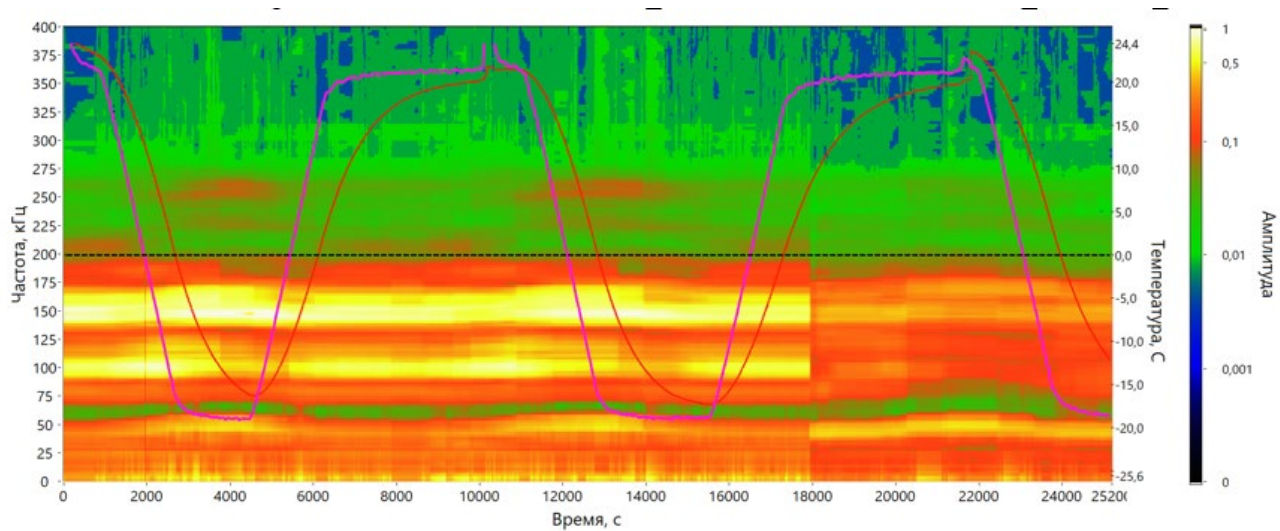


Рисунок 3.2.3 – Пример спектрограммы, полученной для частично водонасыщенных образцов ($W^a \rightarrow 2\%$) каменного угля

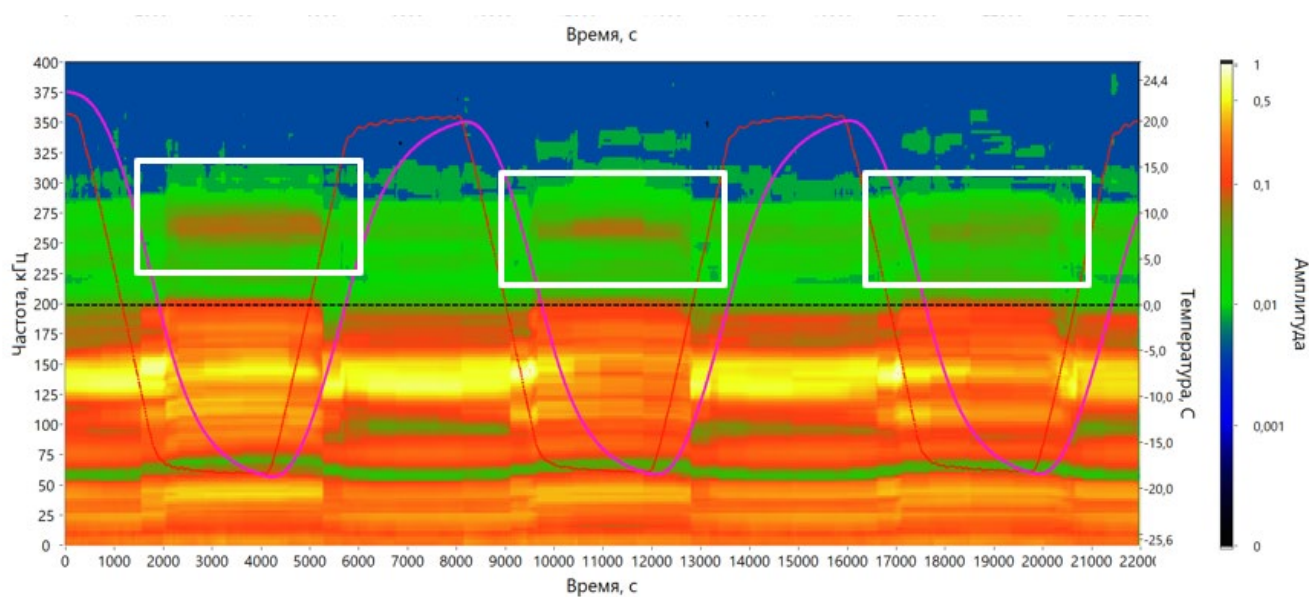


Условные обозначения

----- Температура воздуха в камере

----- Температура воздуха в образце

Рисунок 3.2.4 – Пример спектрограммы, полученной для неводонасыщенных образцов ($W^a \rightarrow 0\%$) антрацита

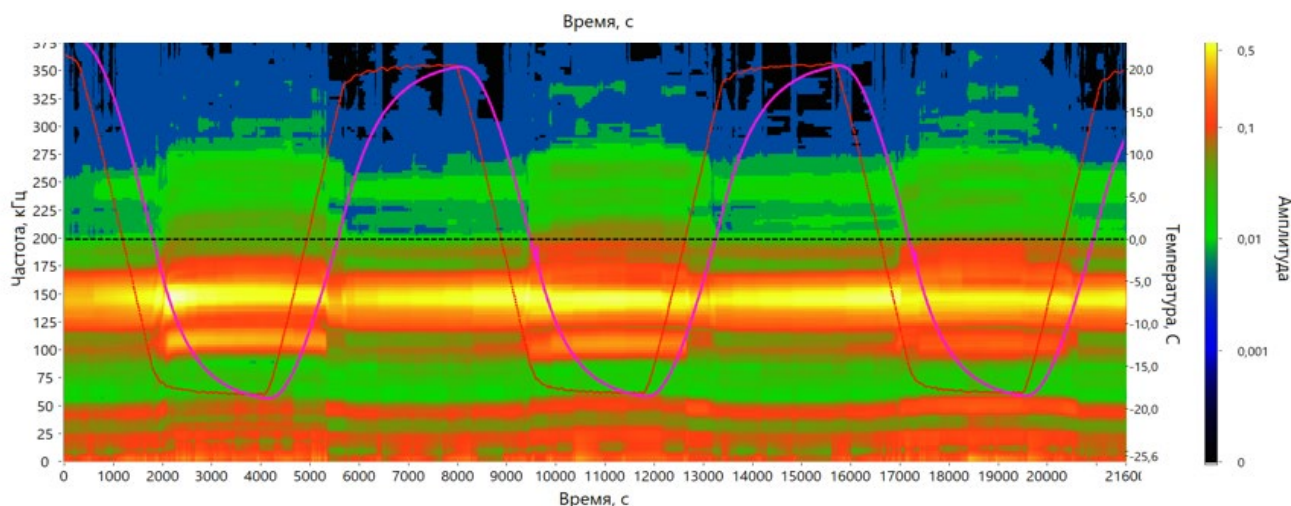


Условные обозначения

----- Температура воздуха в камере

----- Температура воздуха в образце

Рисунок 3.2.5 – Пример спектрограммы, полученной для частично водонасыщенных образцов ($W^a \approx 1\%$) антрацита



Условные обозначения
 ----- Температура воздуха в камере
 ----- Температура воздуха в образце

Рисунок 3.2.6 – Пример спектрограммы, полученной для частично водонасыщенных образцов ($W^a \rightarrow 2\%$) антрацита

Анализируя полученные данные, можно утверждать, что вид угля, а также степень водонасыщения образцов существенно влияют на их устойчивость к циклическому замораживанию-оттаиванию. Для сухих образцов обоих видов углей характерно обратимое циклическое изменение спектров сигналов, что свидетельствует об отсутствии образования значительных дефектов. Увеличение содержания влаги в образцах до 1% не приводит к росту затухания сигналов, однако потеря части высокочастотных составляющих в спектрах сигналов свидетельствует об образовании малых по размеру дефектов. Дальнейшее увеличение содержания влаги до 2% приводит к необратимым изменениям различных спектральных характеристик (в частности ширины спектра) продольных волн на фоне образования трещин вдоль плоскостей напластования.

Более детальный анализ изменений спектров сигналов возможен с применением различных информативных параметров.

Значения полной энергии сигналов напрямую коррелирует с затуханием упругих волн в среде и может служить для интегральной оценки нарушенности образцов угля. На рисунке 3.2.7 и 3.2.8 представлены результаты вычислений

нормированных по максимальным значениям энергий сигналов для образцов обеих групп. Для удобства анализа значения энергий для однотипных образцов в одинаковых условиях (например, для образцов K1 и K2) усреднялись. Границы положительных и отрицательных температур даны на основании температуры внутри образца.

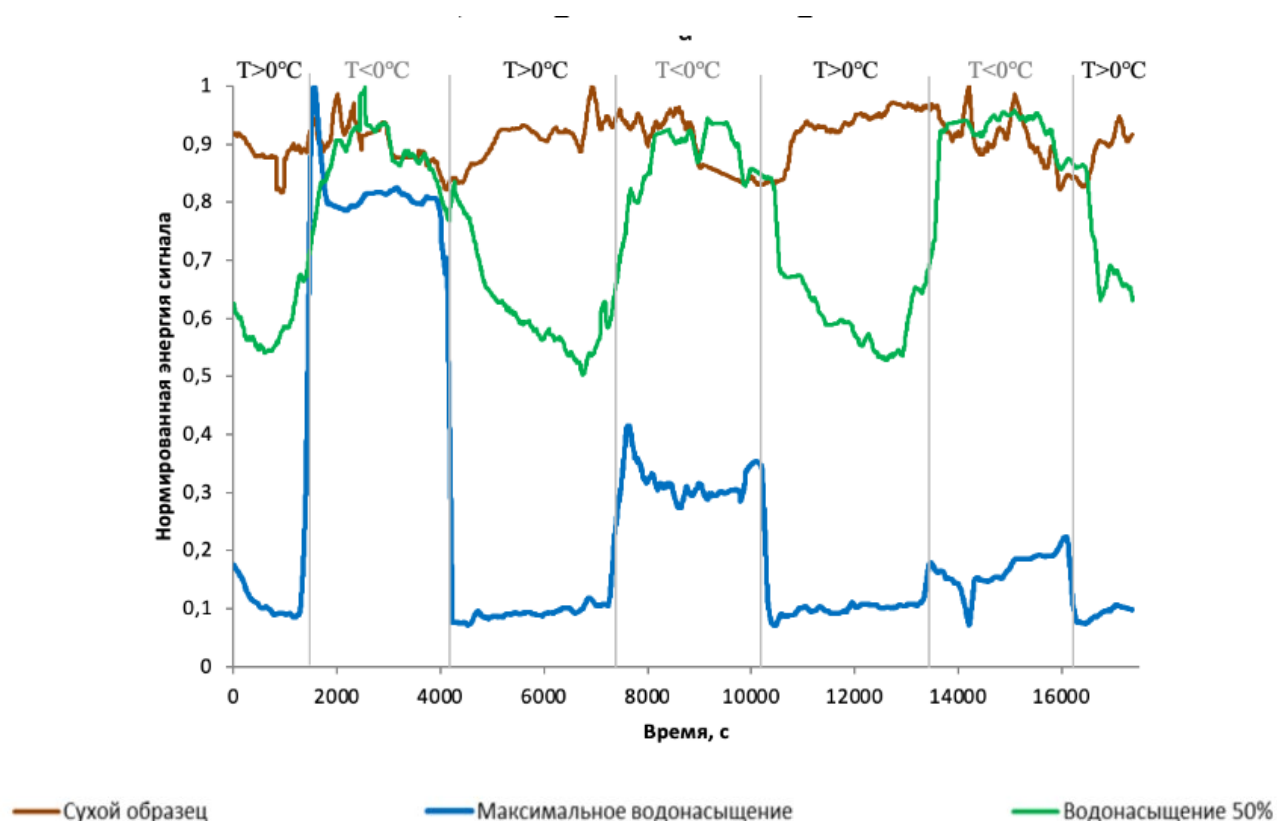


Рисунок 3.2.7 – Значения нормированных энергий сигналов для образцов каменных углей

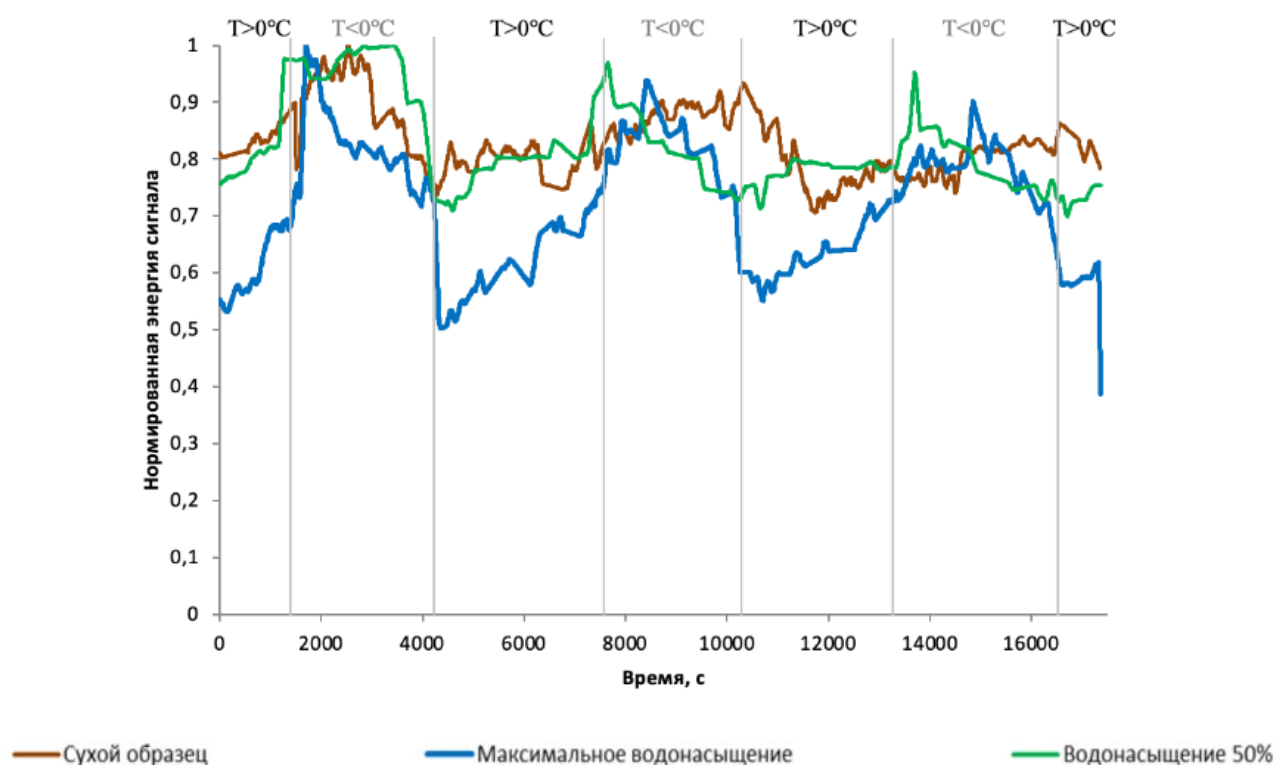


Рисунок 3.2.8 – Значения нормированных энергий сигналов для образцов антрацита

Еще одним важным параметром при спектральном анализе является ширина спектра. Так в [140] отмечается сужение спектра с увеличением степени нарушенности породы. Это объясняется тем, что новообразованные трещины выступают в качестве фильтров нижних частот. При анализе реальных ультразвуковых сигналов, прошедших через такую дефектную среду как уголь, классические методы оценки ширины спектра не всегда применимы из-за возникновения множества локальных спектральных максимумов на различных частотах. В настоящей работе для оценки ширины спектра предлагается использовать интервал корреляции сигнала τ_k , вычисляемый по формуле (2.4.2).

В общем случае увеличение τ_k свидетельствует о сужении спектра и, наоборот, снижение τ_k как правило характерно для увеличения ширины спектра. На Рисунке 6 представлены результаты расчета τ_k для всех испытанных образцов угля.

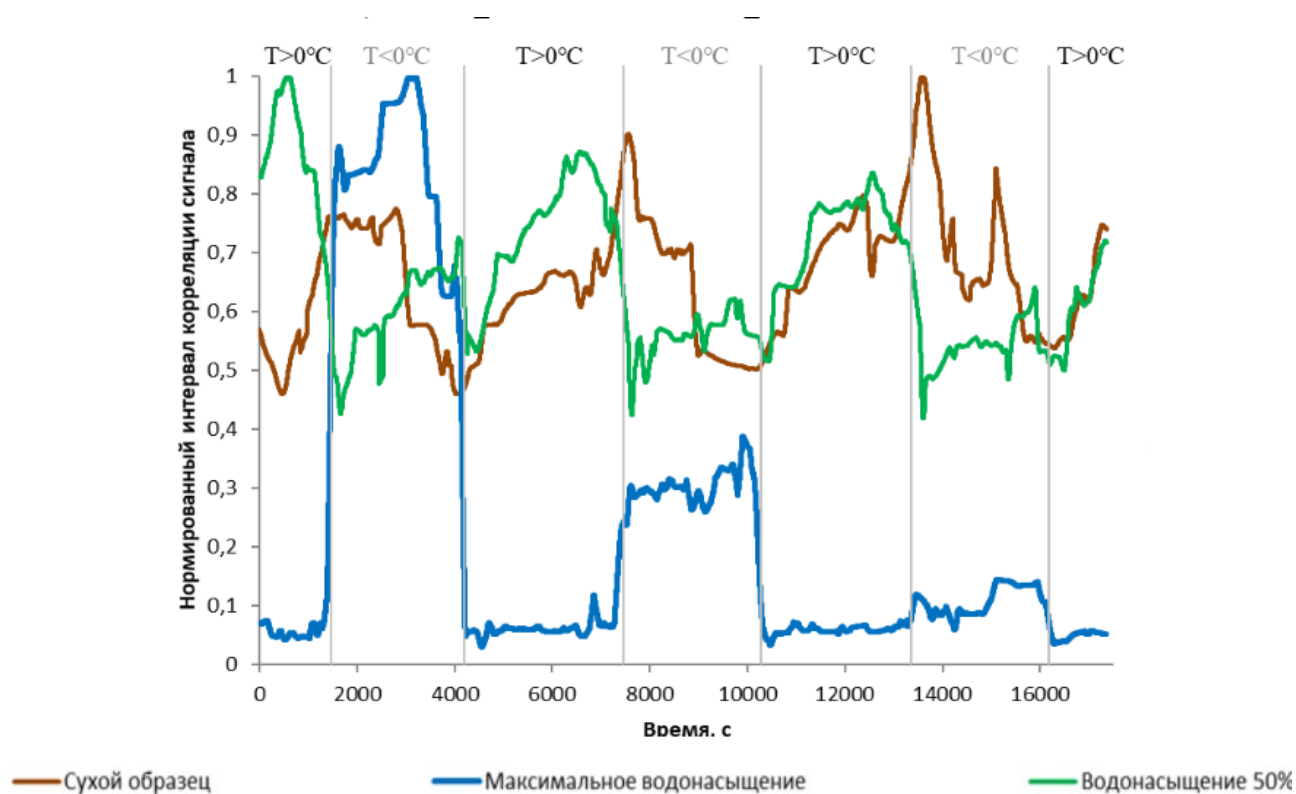


Рисунок 3.2.9 – Значения нормированных интервалов корреляции сигналов для образцов каменных углей

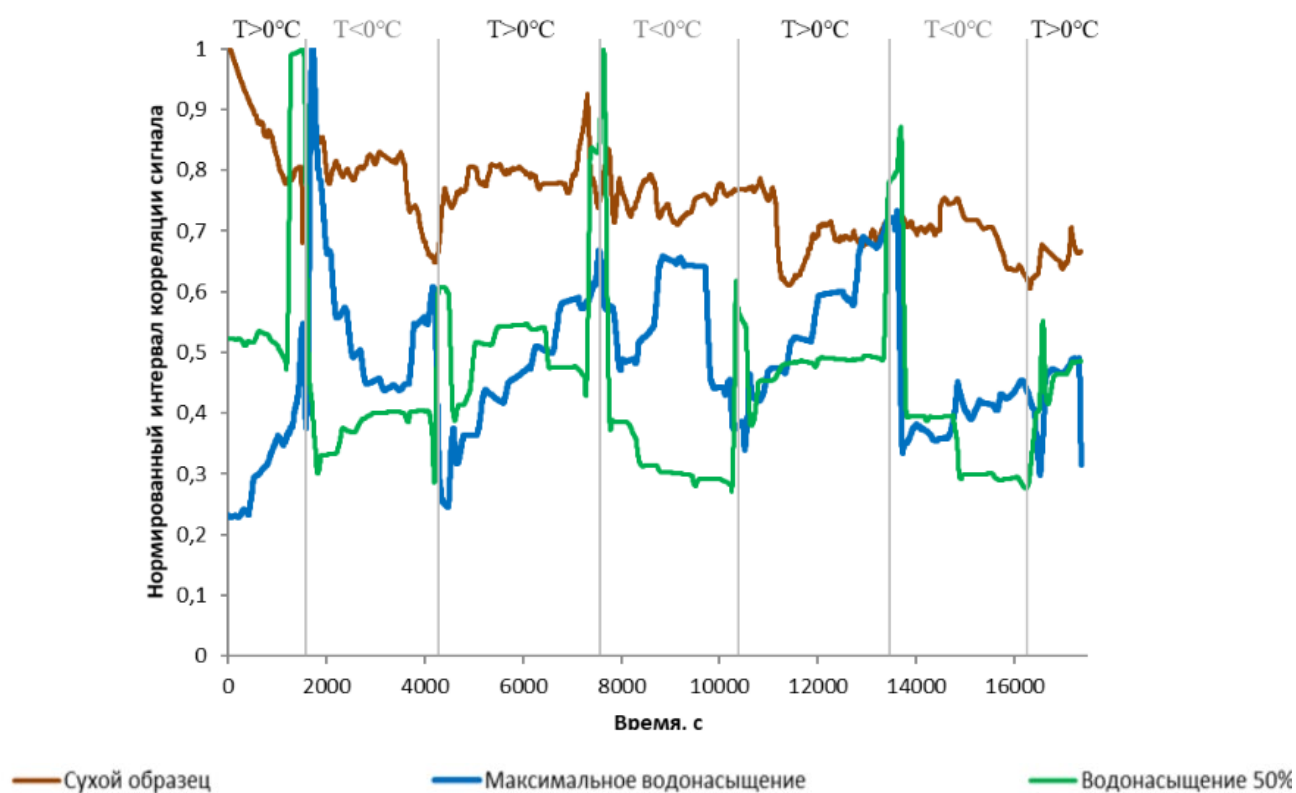


Рисунок 3.2.10 – Значения нормированных интервалов корреляции сигналов для образцов антрацита

По результатам выполненных исследований установлено, что циклическое замораживание-оттаивание существенно влияет на спектральные характеристики ультразвуковых сигналов. Данные изменения отражены на спектрограммах. Изменения спектральной композиции продольных волн в образцах угля являются следствием двух основных факторов: фазовой трансформации воды и повышения уровня дефектности образца (образования новых трещин или роста существующих) вследствие возникновения внутренних растягивающих напряжений при образовании льда. Первый фактор ведет к обратимым изменениям и проявляется в виде циклического изменения спектральных характеристик сигналов с горизонтальным трендом. Яркий пример такого циклического изменения можно увидеть на спектрограмме при испытании углей в сухом состоянии, в виде отчетливо проявляющегося смещения максимума спектра (на частоте 150 кГц) в область высоких частот при переходе в зону отрицательных температур. Смещение носит плавный циклический характер, полностью восстанавливая исходные значения по завершению цикла замораживания-оттаивания. Амплитуда смещения составляет ≈ 15 кГц. Существенных изменений в энергии сигналов не наблюдается. Вышесказанное свидетельствует о том, что при таком режиме низкотемпературного воздействия в угле не происходит существенного образования макро дефектов. Смещение частоты спектра при этом вызвано фазовым переходом остаточной влаги. Уменьшение поглощения энергии ультразвуковых колебаний в замороженной воде [141] обуславливает меньшее затухание сигнала и, как следствие, повышение доли высокочастотных составляющих в спектрах.

Для образцов с максимальным водонасыщением характерно кардинальное изменение спектрального состава сигналов. Такие изменения происходят скачкообразно в промежутки времени между началом промерзания поверхности образца и его полным промерзанием. Из характерных особенностей изменения можно выделить резкое проявление центральной частоты спектра на уровне 150 кГц при переходе в зону отрицательных температур, существенное снижение энергии акустических импульсов при переходе от отрицательных к положительным температурам, а также сужение спектра при нахождении образца в зоне отрицательных

температур. Также отличительной особенностью изменения спектров является нециклический характер их изменения. Это отчетливо видно по изменению энергии сигналов и ширины спектров. Так, после первого цикла замораживания-оттаивания для образцов каменного угля энергия сигналов сокращается на 60% от начального значения. После второго цикла происходит снижение дополнительно на 20%. Для образцов антрацита снижение менее выражено – 8% после первого цикла и дополнительно 2% после второго. Указанные необратимые изменения указывают на возникновение макротрещин вдоль напластования, наиболее ярко выраженных в образцах каменных углей. Такое различие согласуется с последними результатами изучения прочности различных видов углей методом непрерывного индентирования [142].

Для образцов с частичным водонасыщением также характерно резкое изменение спектральных характеристик при переходе в отрицательную область температур. Однако, в отличие от образцов с максимальным водонасыщением, эти изменения носят преимущественно циклический обратимый характер. В частности, энергия импульсов практически не снижается с ростом циклов замораживания-оттаивания. Это, очевидно, связано с отсутствием возникновения значимых трещин, способных привести к росту затухания ультразвуковых импульсов. Однако при этом снижение интервала корреляции (сужение спектра) указывает на образование ограниченного количества новых дефектов, выступающих в качестве фильтров нижних частот. Если для упрощения принять форму таких дефектов за изометрическую, то их характерный размер R можно оценить из выражения [143]

$$R \simeq \frac{V_p}{20f_s}, \quad (3.2.1)$$

где f_s – частота среза (частота, на которой колебания в среде практически перестают распространяться из-за рассеяния на дефектах с характерным размером R).

Потеря амплитуд для частично водонасыщенных образцов происходит на частоте порядка 275 кГц (Рисунок 3.2.3, 3.2.5, белые прямоугольники). При $V_p = 2000$ м/с значение $R \approx 0,3$ мм. При этом пространственную ориентацию и расположение таких дефектов возможно оценить только с использованием более сложных

акустических методов, например с использованием многоканальной ультразвуковой томографии.

В результате экспериментальных исследований было установлено, что вид угля, а также степень водонасыщения образцов существенно влияют на их устойчивость к циклическому замораживанию-оттаиванию. Для сухих образцов обоих видов углей характерно обратимое циклическое изменение спектров сигналов, что свидетельствует об отсутствии образования значительных дефектов. Увеличение содержания влаги в образцах до 1% не приводит к росту затухания сигналов, однако потеря части высокочастотных составляющих в спектрах сигналов свидетельствует об образовании малых по размеру дефектов. Дальнейшее увеличение содержания влаги до 2% приводит к необратимым изменениям различных спектральных характеристик продольных волн на фоне образования трещин вдоль плоскостей напластования. При этом более однородный антрацит показывает значительно большую устойчивость к циклическому низкотемпературному воздействию.

Применение ультразвукового прозвучивания продольными волнами в сочетании со спектральной обработкой сигналов может быть использовано для прогноза нарушенности углей в процессе их транспортировки, а также для экспресс-анализа уровня содержания влаги в угле, находящемся в условиях отрицательных температур. Кроме того, полученные результаты могут стать экспериментальным базисом для разработки новых подходов к разрушению углей под воздействием ЦЗО при решении задач дегазации пластов.

3.3 Выводы

По результатам анализа экспериментальных данных, полученных при испытаниях образцов угля с применением поперечных волн установлено, что акустические свойства углей изменяются под воздействием циклического термического воздействия. В ходе исследования закономерности распространения поляризованной сдвиговой волны в углях, сделаны следующие выводы:

- При исследовании влияния циклического замораживания-оттаивания образцов углей различных генотипов на характеристики принимаемых ультразвуковых

сигналов была показана высокая чувствительность амплитуды сдвиговой волны к возникновению и ориентации новых дефектов.

-По результатам анализа лабораторных экспериментов было установлено, что наибольшее количество трещин возникает после первого цикла низкотемпературного воздействия. Это видно по резкому снижению параметра S – площади диаграммы распределения амплитуд поперечной волны по азимутальным углам. Причем наиболее значительное падение наблюдается при исследованиях образцов антрацита, обладающего наибольшей прочностью и плотностью. Наименьший прирост дефектов наблюдался на образцах бурого угля, изначальная нарушенность которого была самой сильной. Последнее также отражается в значениях коэффициента $k_{c.d.}$ устойчивости к ЦЗО.

- Изменение ориентации плоскости поляризации сдвиговой волны позволило зафиксировать изначальный уровень анизотропии в исследуемых образцах, а также оценить его изменение с увеличением числа циклов замораживания-оттаивания. В нулевом цикле (до низкотемпературного воздействия) наибольший коэффициент анизотропии наблюдался в образцах антрацита, наименьший – в образцах бурого и каменного угля. С ростом количества циклов замораживания оттаивания для всех образцов коэффициент анизотропии испытывает нелинейное снижение, достигая минимальных значений после 3-6 циклов. Далее коэффициент анизотропии стабилизируется на более или менее постоянном уровне. При этом существенных различий в характере спада указанного коэффициента при исследовании углей различного генотипа не наблюдается. Высокая чувствительность сдвиговых волн к трещинам свидетельствует о том, что наибольший прирост трещин при циклическом низкотемпературном воздействии происходит в направлении, ортогональном оси естественной анизотропии.

- Спектральный анализ демонстрирует влияние образующихся трещин на спектральный состав принимаемых сигналов. Наиболее резкое изменение спектрального состава наблюдается после первого цикла замораживания-оттаивания в образцах антрацита. Такое изменение проявляется в виде резкого снижения частоты максимума спектра принятого сигнала, а также в виде роста его интервала корреляции. Значительных изменений спектрального состава менее прочных углей

(каменного и бурого) не наблюдается. Это обуславливается тем, что наибольшие термические напряжения возникают вдоль наиболее прочных и упругих связей. В изначально нарушенных углях не возникает условий для концентрации напряжений, что, в свою очередь, приводит к менее интенсивному трещинообразованию, особенно после первого цикла замораживания-оттаивания.

В результате экспериментальных исследований с использованием продольных упругих волн, было установлено, что вид угля, а также степень водонасыщения образцов существенно влияют на их устойчивость к циклическому замораживанию-оттаиванию. Для сухих образцов обоих видов углей характерно обратимое циклическое изменение спектров сигналов, что свидетельствует об отсутствии образования значительных дефектов. Увеличение содержания влаги в образцах до 1% не приводит к росту затухания сигналов, однако потеря части высокочастотных составляющих в спектрах сигналов свидетельствует об образовании малых по размеру дефектов. Дальнейшее увеличение содержания влаги до 2% приводит к необратимым изменениям различных спектральных характеристик продольных волн на фоне образования трещин вдоль плоскостей напластования. При этом более однородный антрацит показывает значительно большую устойчивость к циклическому низкотемпературному воздействию.

Применение ультразвукового прозвучивания продольными волнами в сочетании со спектральной обработкой сигналов может быть использовано для прогноза возникновения и развития нарушенности углей в процессе их транспортировки, а также для экспресс-анализа уровня содержания влаги в угле, находящемся в условиях отрицательных температур. Кроме того, полученные результаты могут стать экспериментальным базисом для разработки новых подходов к разрушению углей при решении задач дегазации пластов.

4 СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ УГЛЕЙ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЦЗО ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ И ХРАНЕНИИ УГЛЯ

4.1 Способ оценки влияния ЦЗО при транспортировке и хранении угля на структуру, свойства и состояние ископаемых углей

На основе результатов проведенных экспериментальных исследований был разработан способ оценки склонности углей к возникновению и развитию нарушений после воздействия циклической заморозки-оттаивания. При этом предлагается следующая градация углей по устойчивости при ЦЗО: сильная склонность, умеренная склонность, отсутствие склонности к дезинтеграции.

Способ оценки предназначен для корректировки сроков хранения и порядка реализации угольной продукции на основе анализа устойчивости к воздействию ЦЗО под воздействием циклического замораживания-оттаивания.

Сущность данного способа заключается в использовании ультразвукового прозвучивания образцов поляризованными поперечными волнами. Изменение угла поворота поляризации таких волн в сочетании с использованием динамических информативных параметров позволяет оценивать склонность исследуемых углей к частичному или полному разрушению в процессе циклического замораживания-оттаивания.

Ниже приведена последовательность проведения измерений (рисунок 4.1.1):

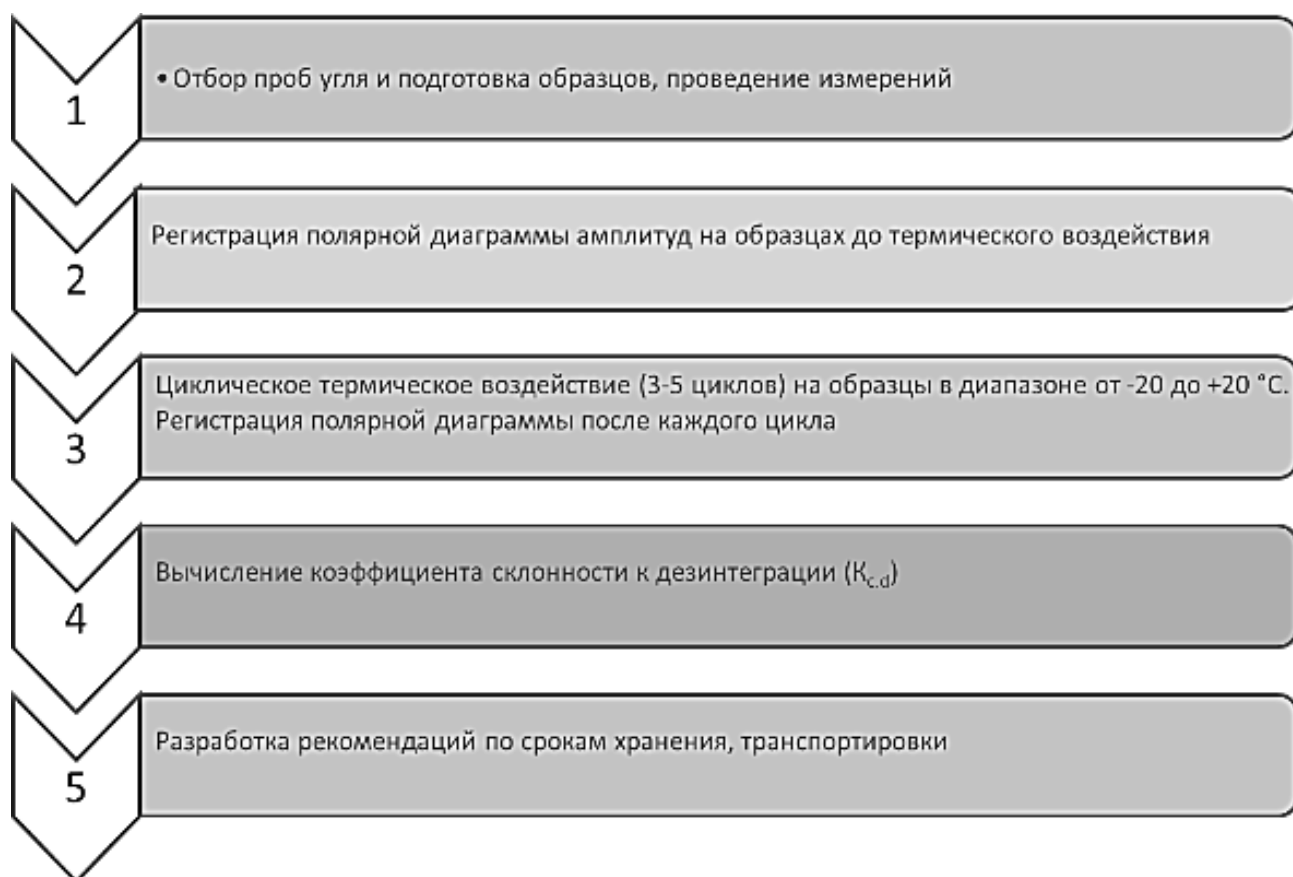


Рисунок 4.1.1 – Последовательность выполнения измерений

Такой способ оценки может быть использован для решения научно-исследовательских и производственных задач в горном деле, экологии, транспортировке, обогащении и переработке полезных ископаемых.

Обеспечение результатов измерения для оценки влияния выветривания под циклическим воздействием низких температур при транспортировке и хранении угля осуществляется с помощью следующих средств измерения, стандартных образцов, вспомогательного и испытательного оборудования:

Комплект оборудования состоит из лабораторного стенда ультразвуковых испытаний и климатической камеры.

Главным составляющим лабораторного стенда служит акустополярископ (Рис 4.1.2), разработанный Горбацевичем Ф.Ф. В конструкции акустополярископа во время измерения неподвижный образец вращается на вращающейся платформе относительно стационарных ультразвуковых преобразователей. Устройство состоит из основания (1), закрепленного на опоре (2). Устройство имеет пазы, в

которых расположены верхний (3) и нижний (4) преобразователи. Они предназначены для излучения и приема линейно-поляризованных колебаний. Образец закреплен на вращающейся платформе (6) с помощью опор (5). Общая нагрузка на контактные поверхности датчиков и образца осуществляется одной пружиной и поддерживается постоянной с помощью цифрового устройства управления крутящим моментом (7).

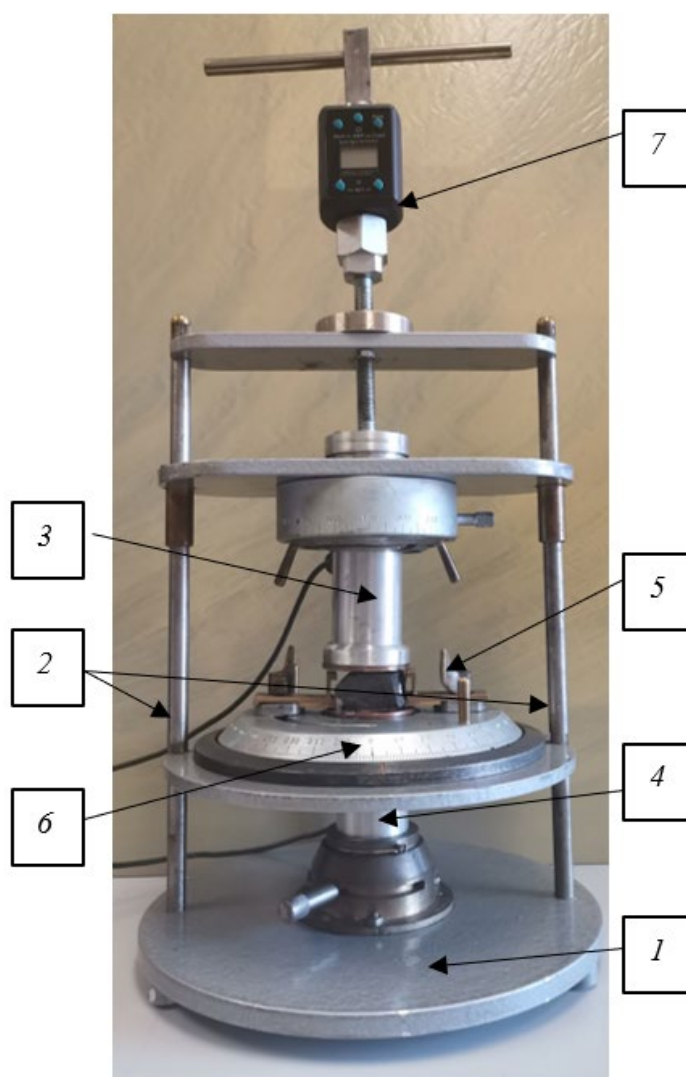


Рисунок 4.1.2 – Акустополярископ

При выполнении измерений акустические преобразователи поперечных волн должны быть закреплены так, чтобы плоскости поляризации излученной и принятой S-волны совпадали.

Рекомендуемые преобразователи для обеспечения ультразвуковых измерений - широкополосные с центральной частотой $f = 600$ кГц.

На излучающий преобразователь подавался сигнал с генератора импульсов в виде меандра амплитудой до 300 В.

Передача сигнала на компьютер с приемного преобразователя на вход аналого-цифрового преобразователя должна осуществляться с частотой дискретизации не менее 5 МГц. Рекомендуемая длина записи - 1024 отсчета (205 мс).

Для обеспечения надлежащего акустического контакта образца с преобразователями рекомендуется использовать мелкозернистую наждачную бумагу, предварительно приклеенную к протекторам акустических преобразователей, что позволит сохранить постоянство условий измерений вне зависимости от количества ЦЗО.

Для ЦЗО образцов углей должна применяться климатическая камера с диапазоном задаваемых температур, от -40° до $+20^{\circ}\text{C}$ (точность поддержания температуры $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$). Диапазон поддержания относительной влажности в камере должен осуществляться постоянным – 30%, с допустимым отклонением до 3%.

В ходе ультразвуковых измерений регистрируется величина максимальной амплитуды сигнала в результате осреднения результатов 50 последовательных измерений для увеличения точности получаемых данных и исключения влияния случайных ошибок.

Отбор проб для последующего изготовления образцов осуществляется согласно пункту 3.2 ГОСТ 10742-71. Для исключения влияния сторонних факторов на образец, таких как температурно-влажностное воздействие, первичная обработка угля (орошения водой, эмульсиями, солевыми растворами) и пр. после отбора, пробы уголь помещают в герметичные емкости.

Подготовка образцов заключается в сухом шлифовании их поверхности до образования двух параллельных граней. Грани образцов обрабатываются и пришлифовываются таким образом, чтобы обеспечивалась воспроизводимость результатов.

Минимальную высоту образца определяют по ГОСТ 21153.0-75. При этом минимальная высота (l) должна подчиняться условию:

$$l \geq 3V_p/f_o, \quad (4.1.1)$$

где V_p - скорость распространения продольных колебаний в среде, f_o – центральная частота ультразвукового преобразователя.

Площадь параллельных граней должна превышать площадь протектора используемого акустического преобразователя.

Для обеспечения точности, правильности и надежности измерений, до начала выполнения измерений необходимо выполнить юстировку акустополярископа по методике, предложенной Горбачевичем Ф.Ф [125].

Метод измерений заключается в следующем:

1 На поверхность подготовленных образцов наносится метка, отмечающее начальное положение при ультразвуковом прозвучивании ($\theta = 0^\circ$). Перед началом циклического термического воздействия на всех образцах экспериментально определяются значения A_s (рис 4.1.3) с шагом $\theta = 30^\circ$ для формирования массива данных о первичном состоянии углей (0 цикл).

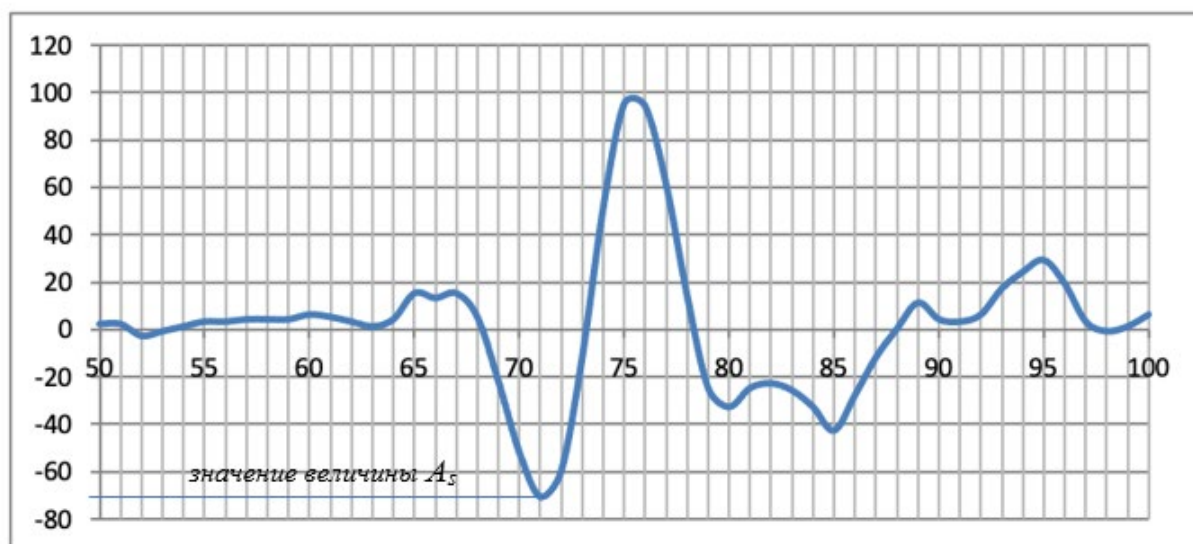


Рисунок 4.1.3 – Пример волновой формы для регистрации амплитуды поперечной волны

2 Результаты измерений амплитуды поперечной волны в виде полярных диаграмм распределения информативного параметра в функции от угла поворота.

3 Образцы помещаются в климатическую камеру, где производится их ЦЗО в температурном диапазоне от -40°C до $+20^{\circ}\text{C}$.. Уровень влажности окружающего воздуха поддерживается постоянным и равным 30%.

4 Повторные исследования акустических свойств образцов производятся после 1, 3, 6, 10, 15 ЦЗО. На время проведения экспериментов образцы угля хранятся в герметичных контейнерах, обеспечивающих постоянство влажности всех проб.

5 Для каждого образца угля формируются матрицы значений A_s для различных значений θ и номеров ЦЗО.

6 Далее с целью оценки склонности углей к разрушению под влиянием циклического замораживания-оттаивания выполняется вычисление коэффициента устойчивости к ЦЗО $k_{c.d.}$.

Анализ результатов вычислений необходимо выполнять по Таблице 4.1.1

Порядок регистрации амплитуд сдвиговых волн на образцах угля следующий:

1 Перед измерением датчики сдвиговых колебаний подключаются к генератору ультразвуковых импульсов таким образом, чтобы верхний преобразователь был излучающим.

2 Подвижная платформа прикрепляется к дополнительному кронштейну на нулевой отметке угловой шкалы напротив маркировки. Метки векторов поляризации преобразователей должны быть совмещены на одной линии.

3 Контактная среда - наждачная бумага с размером зерен не менее Р60 - приклеивается к контактными поверхностям датчиков. Необходимо обеспечить такие условия, чтобы контактная среда полностью покрывала контактные поверхности датчиков и образца без перерывов.

4 После того, как образец помещен на контактную поверхность нижнего датчика и прикреплен к вращающейся платформе, шток верхнего пьезопреобразователя направляется вниз до тех пор, пока положение датчиков не обеспечит

акустический контакт с образцом. В результате пружина сжимается у основания стержня и фиксируется в сжатом состоянии, что обеспечивает равномерное давление контактных поверхностей на кромке образца. Требуется некоторое время, чтобы контактная среда образовала тонкий ровный слой в зазоре между наждачной бумагой и преобразователями. Как правило, по истечении этого времени амплитуда сдвигового импульса (примерно на экране устройства) больше не увеличивается.

5 Измерения включают перемещение вращающейся платформы с шагом 30° и фиксацию амплитуды первого входа сдвиговых колебаний, проходящих через образец.

6 Измерения завершаются, когда индикатор угла установлен на отметку 360° шкалы.

7 После завершения измерений освобождают фиксатор и вынимают образец из акустополарископа для последующего циклического замораживания-оттаивания.

Таблица 4.1.1 – Границы значений $k_{c.d}$

Устойчивость к ЦЗО	Значение коэффициента устойчивости к ЦЗО $k_{c.d}$
Не устойчивые к ЦЗО	$0 < k_{c.d} < 0,3$
Умеренная устойчивость к ЦЗО	$0,3 < k_{c.d} < 0,7$
Устойчивые к ЦЗО	$0,7 < k_{c.d} < 1$

4.2 Способ оценки влияния влажности углей на структуру, свойства и состояние в процессе транспортировки и хранения

Назначением способа является оценка поврежденности углей в процессе их транспортировки и хранения в условиях изменяющегося уровня насыщения влагой, а также экспресс-анализ уровня содержания влаги в угле в условиях отрицательных температур.

Для выполнения необходимо следующее аппаратное обеспечение:

1. Акустические пьезопреобразователи с центральной частотой 150 кГц;
2. Генератор импульса амплитудой до 300 В;
3. АЦП с частотой дискретизации не менее 5 МГц;
4. Персональный компьютер (ПК).

Суть способа заключается в оценке нарушенности образцов на основании спектрального анализа сигнала с применением нормированных энергий сигналов и ширины спектра сигнала по максимальным значениям.

Отбор проб для последующего изготовления образцов осуществляется согласно пункту 3.2 ГОСТ 10742-71. Для исключения влияния сторонних факторов на образец, таких как температурно-влажностное воздействие, первичная обработка угля (орошения водой, эмульсиями, солевыми растворами) и пр. после отбора, пробы угля помещают в герметичные емкости.

Подготовка образцов заключается в сухом шлифовании их поверхности до образования двух параллельных граней. Грани образцов обрабатываются и пришлифовываются таким образом, чтобы обеспечивалась воспроизводимость результатов.

Минимальную высоту образца определяют по ГОСТ 21153.0-75. При этом минимальная высота (1) должна подчиняться условию:

$$l \geq 3V_p/f_o, \quad (4.2.1)$$

где V_p - скорость распространения продольных колебаний в среде, f_o – центральная частота ультразвукового преобразователя.

Площадь параллельных граней должна превышать площадь протектора используемого акустического преобразователя.

Выполнения исследований производится, согласно схеме, Рисунок 4.2.1.

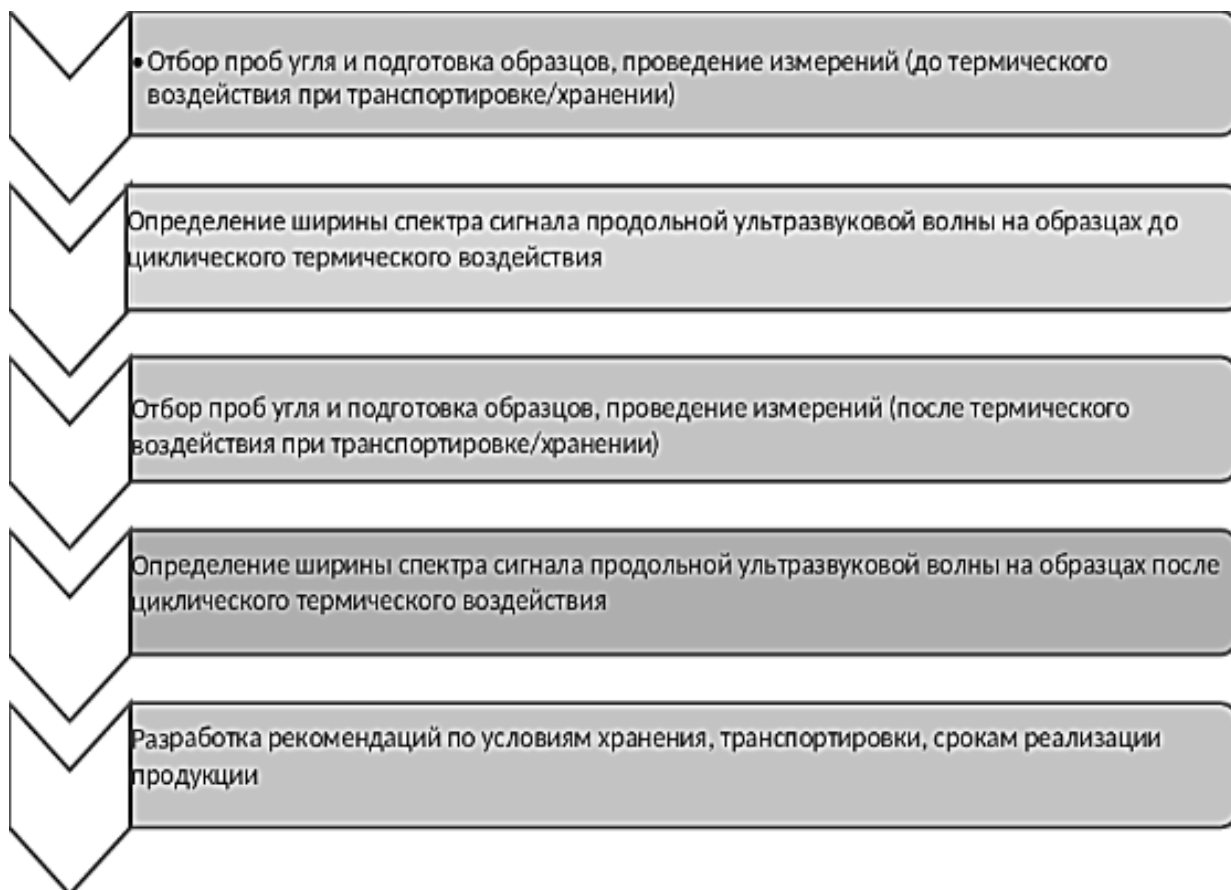


Рисунок 4.2.1 - Последовательность выполнения измерений

В ходе измерений передачу энергии упругих колебаний на границах «преобразователь-образец» рекомендуется выполнять без использования контактных жидкостей для исключения их влияния на параметры сигнала при переходе через температуру замерзания.

В результате испытаний для каждого образца формируется база волновых форм. Обработка сигналов заключается в вычислении их спектров с применением быстрого преобразования Фурье.

Результатом измерений является оценка относительной поврежденности по определению изменений спектров ультразвуковых сигналов при ЦЗО.

Для оценки ширины спектра необходимо использовать интервал корреляции сигнала τ_k — увеличение τ_k свидетельствует об увеличении нарушенности геоматериала.

4.3 Рекомендации на основании результатов оценки поврежденности углей под влиянием ЦЗО

Значения коэффициента устойчивости к ЦЗО могут применяться для корректировки условий хранения угля, а также для разработки и поэтапной реализации комплекса мероприятий по снижению потерь при транспортировке. Данные изменения технологии хранения, транспортировки и потребления должны быть учтены на этапе централизованной оценке качества угля при добыче.

Анализ действующей нормативной базы показал существенные различия в сроках хранения углей в нормативной документации, в типовых инструкциях и в сроках хранения углей. Используемая классификация углей не актуальна из-за склонности углей к окислению, поскольку классификатор не регламентирует характеристики и методы их оценки, в соответствии с которыми угли распределяются по группам, на основании которых устанавливаются сроки хранения углей.

В связи с чем предлагается в Классификации углей, выполнить ранжировку углей не только по группам склонности к окислению, но и по склонности к нарушенности, что минимизирует риски самовозгорания, обеспечит постоянство важных технических характеристик (таких как крупность) в выбранных условиях хранения. На основании классификации углей по склонности к нарушенности также может быть предусмотрен проект по логистической цепочки от добывающего предприятия к потребителю.

Как упоминалось в [54], при хранении угольной продукции навалом, в сортовом виде на открытых площадках происходит изменение гранулометрического состава топлива со значительным увеличением выхода мелких классов (0–10 мм), которые в основном не участвуют в сжигании в печах ТЭЦ.

Опираясь на анализ различных источников, на существующую нормативную и техническую рекомендацию, с целью снижения потерь твердого топлива и

сохранении его свойств, автором предлагается следующая классификация, подразумевающая поправки в условиях хранения углей, представленная в таблице 4.3.1:

Таблица 4.3.1 – Рекомендации по хранению угля согласно устойчивости к ЦЗО

Устойчивость к ЦЗО	Показания интервала корреляции τ_k	Особенности хранения угля
Не устойчивые к ЦЗО ($0 < k_{c.d.} < 0,3$)	Увеличение τ_k	Хранить в закрытых и заглубленных складах, предусматривать средства от защиты (экранирования) от попадания атмосферных осадков и прямого попадания солнечных лучей
Умеренная устойчивость к ЦЗО ($0,3 < k_{c.d.} < 0,7$)	Увеличение τ_k	Хранить под открытыми навесами, настилами, и пр. для обеспечения защиты (экранирования) от попадания атмосферных осадков и прямого попадания солнечных лучей
Устойчивые к ЦЗО $0,7 < k_{c.d.} < 1$	τ_k не изменилось	Хранение угля возможно навалом, на открытых площадках, защита (экранирование) от попадания атмосферных осадков и прямого попадания солнечных лучей не требуется

Разработка рекомендаций по срокам хранения, транспортировки и реализации угольной продукции производится при первичном (после добычи) и входном контроле (после транспортировки) на основании полученных данных для каждого вида углей на каждом предприятии.

Использование вышеописанных способов исследований углей позволит оперативно оценивать изменение качества угольной продукции и принимать организационные и технологические решения по сохранению потребительских свойств углей в процессе транспортировки и хранения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой законченную научно-квалификационную работу, на основе выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований влияния циклического замораживания-оттаивания на различные информативные параметры продольных и поперечных волн ультразвукового диапазона частот решена актуальная научная задача обоснования и разработки активных ультразвуковых способов оценки поврежденности углей под влиянием ЦЗО, что имеет значение для повышения надежности контроля качества угольной продукции при ее транспортировке и хранении, а также для развития угледобывающей промышленности в целом.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации, полученные лично автором:

1. Обоснованы принципы и оптимальные информативные параметры экспериментального исследования влияния ЦЗО на параметры ультразвуковых сигналов в образцах угля различных видов. Установлено, что наиболее информативными являются амплитуда поперечных волн, спектральные характеристики продольных и поперечных волн, в т.ч. оценка ширины спектра сигнала и величина полной энергии сигнала.
2. Разработано методическое и специализированное аппаратное обеспечение для проведения акустических исследований на образцах углей, подвергаемых циклическому замораживанию-оттаиванию. С целью повышения эффективности ультразвукового контроля с применением поперечных волн был разработан и запатентован способ изготовления протектора акустического преобразователя для снижения потерь сдвиговых колебаний (Патент РФ № 2716854 С1).
3. Экспериментально доказано, что с ростом количества циклов замораживания-оттаивания степень дефектности в образцах углей возрастает. При этом в условиях неизменной влажности наибольшую склонность к повреждению под воздействием ЦЗО проявили наиболее прочные и однородные угли – антрациты.

4. Показано, что содержание влаги оказывает существенное влияние на поврежденность ископаемых углей, что выражается в заметном изменении спектрального состава зарегистрированных ультразвуковых колебаний: для сухих образцов всех видов угля характерны обратимые циклические изменения спектров сигналов, что свидетельствует об отсутствии образования значительных дефектов, увеличение содержания влаги ведет к образованию малых по размеру дефектов, что отражает потеря высокочастотных составляющих спектра сигнала. Дальнейшее увеличение влаги до 2% приводит к необратимым изменениям в структуре угля, о чем свидетельствуют спектральные характеристики сигнала.
5. Обоснованы способы ультразвуковой диагностики степени поврежденности углей, подвергнутых циклическому замораживанию-оттаиванию, основанные на анализе динамических параметров поперечных волн с управляемым вектором поляризации, а также спектральном анализе продольных волн ультразвукового сигнала. Разработано аппаратное и методическое обеспечение ультразвуковой диагностики.
6. Разработана «Методика контроля степени дезинтеграции ископаемого угля, подвергнутого циклическому замораживанию-оттаиванию», которая передана в ФГБУН ИПКОН РАН для практического использования при проведении научно-исследовательских работ по теме FMMS-2021-0004 «Развитие теории многофазных гео- и газодинамических процессов в техногенно изменяемом газонасыщенном углелепородном массиве».

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ЦЗО – Циклическая заморозка-оттаивание

ОК – Объект контроля

УЗ – Ультразвук

КУ – Контактные условия

ПЭП – Пьезоэлектрические преобразователи

ТЭЦ – Теплоэлектростанция

ТЭР – топливно-энергетические ресурсы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Климов С. Л. Угольная промышленность и энергетическая безопасность стран мира / С. Л. Климов. - М. : Изд-во Моск. гос. гор. ун-та, 2002. - 671 с.
- 2 Закиров Д. Г. Проблемы и пути повышения экологичности и энергетической эффективности развития угольных предприятий / Д. Г. Закиров, М. А. Мухамедшин, А. В. Николаев, Г. Д. Закиров // Уголь. – No 9. – 2019. – С. 112-115
- 3 Пономаренко Т. В. Оценка перспектив развития угольной генерации на европейском рынке в условиях межтопливной конкуренции / Т. В. Пономаренко, А. А. Вавилова // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. – No 7. – 2017. – С. 77-83
- 4 Газовый рынок Европы: утраченные иллюзии и робкие надежды. Аналитический отчет // М: ВШЭ, 2015. – 86 с. URL: https://www.eriras.ru/files/gazovyy_rynok_evropy.pdf
- 5 Дзюба, А. П. Анализ параметров потребления угля и его роли в выработке электроэнергии в различных регионах мира / А. П. Дзюба // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Экономика. Социология. Культурология. – 2019. – № 4(16). – С. 6-18.
- 6 Распоряжение Правительства РФ от 13.06.2020 № 1582-р «Об утверждении Программы развития угольной промышленности России на период до 2035 года», М.: 2020. - 226 с.
- 7 Угольная генерация: новые вызовы и возможности / Аналитический доклад «Центра энергетики Московской школы управления Сколково. – 2019. 84 С.
- 8 Reliable Prognosis [Electronic resource]. URL: rp5.ru
- 9 Журнал добывающая промышленность №1(25) 2021, стр.88-92 <https://dprom.online/wp-content/uploads/2021/02/dp-1-2021.pdf>
- 10 Гаврилов В. Л., Хохолов Ю. А., Федоров В. И. О влиянии условий доставки угля в труднодоступные северные районы на его потребительские свойства // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2019. — т. 6. — № 3. — С.219—225. DOI: 10.15372/FPVGN2019060337.

- 11 Fedorov V. I., Batugina N. S., Gavrilov V. L., Tkach S. M., Khoiutanov E. A. Small-scale coal mines in hard-to-reach regions in Yakutia: the problems of creation and exploration // Bulgaria 2018, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2017, vol. 53, 012015. DOI:10.1088/1755—1315/53/1/012015.
- 12 Khokholov Yu. A., Gavrilov V. L., Fedorov V. I. Mathematical modeling of heat exchange processes in outdoor storage of frozen coal // Journal of Mining Science, 2019, vol. 55, no. 6, pp. 1013—1022. DOI: 10.1134/S1062739119066405.
- 13 Правила перевозок смерзающихся грузов на железнодорожном транспорте», утверждёнными Приказом Министерства путей сообщения РФ от 05.04.1999 № 20, М.: 1999. - 4 с.
- 14 Логинов М. И., Гордеев И. В., Микерова В. Н., Старокожева Г. И. Состояние, проблемы развития и перспективы освоения угольной сырьевой базы // Минеральные ресурсы Рос сии. Экономика и управление. — 2017. — No 3. — С. 52—61.
- 15 Никулин А.А. Проблемы национальной стратегии // Полезные ископаемые Арктической зоны России: потенциал и перспективы освоения. — 2017. — No 1. — С. 163—187
- 16 Влияние циклического замораживания-размораживания углей на показатели их качества / С. А. Эпштейн, И. М. Никитина, К. В. Агарков [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 6. – С. 5-18.
- 17 Гидрометцентр России [Электронный ресурс]. URL: meteoinfo.ru
- 18 Разовский Ю. В., Горенкова Е. Ю., Киселева С. П., Косякова И. В., Маколова Л. В. Угольный Арктический доход: классификация и методология оценки // Уголь. — 2018. — No 7. — С. 42—44.
- 19 Агарков С. А., Козьменко С. Ю., Матвишин Д. А. Экономическое освоение арктических месторождений угля: особенности морской транспортировки // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. — 2018. — No 5. — С. 105—112.

- 20 Рязанова Н. Е., Соломатов А. С., Сазонов А. А., Никольский Н. В., Колодкин П. А., Кукушкин В. М., Куликов М. Е. Натурные гидрометеорологические исследования в экспедиционных условиях в Арктической зоне // Комплексная научно-образовательная экспедиция «Арктический плавучий университет-2016», 2016. — С. 24—37
- 21 Захаров, В. Е. Потери энергетической ценности рядового угля при доставке до арктических потребителей Республики Саха (Якутия) / В. Е. Захаров, Д. В. Прохоров, В. Л. Гаврилов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. — 2013. — № 5-6. — С. 13-22. — EDN RCMAQR.
- 22 Алехнович А.Н. Топливо-транспортное хозяйство ТЭЦ: учебное пособие/ А.Н. Алехнович: Челябинск: ЧФ ПЭИПК, 2014. - 148 с.
- 23 Роддатис К. Ф., Полтарецкий А. Н. Справочник по котельным установкам малой производительности. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 488 с.
- 24 Selby MJ (1993) Hill slope Materials and Processes. Oxford University Press, India.
- 25 Price DG (1995) Weathering and weathering processes. Quarterly Journal of Engineering Geology 28: 243-252 с.
- 26 Reiche P (1950) A survey of weathering processes and products. University of New Mexico Publications in Geology, 3, University of New Mexico Press, New Mexico, United States.
- 27 Winkler E M. Frost damage to stone and concrete: geological considerations, Engineering Geology, 1968, 2(5) – P. 315-323.
- 28 Finnie I., Cooper G. A., Berlie J. Fracture propagation in rock by transient cooling, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts, 1979, 16(1) – P. 11-21
- 29 Nicholson D. T., Nicholson F. H. Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze-thaw weathering, Earth Surface Processes and Landforms, 2000, 25(12) – P. 1295-1307.
- 30 Федорова Л. Л., Куляндин Г. А., Саввин Д. В. Исследования геокриологических параметров массива горных пород для прогнозирования развития негативных

- криогенных процессов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 6. – С. 183–192.
- 31 Сукнев С. В. Влияние температуры и степени водонасыщения на изменение упругих свойств скальных пород при переходе из талого в мерзлое состояние // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 2. – С. 14–22.
- 32 Захаров Е.В. Удельные показатели разрушения скальных пород под влиянием криогенного выветривания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № S21. – С. 90–100.
- 33 Lin J., Ren T., Wang G., et al. Simulation investigation of N₂-injection enhanced gas drainage: model development and identification of critical parameters, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 55 – P. 30-41.
- 34 Назарова Л.А., Назаров Л.А., Голиков Н.А. Оценка реологических свойств пород-коллекторов пластов баженовской свиты по данным термобарических испытаний // ФТПРПИ. – 2017. – № 3. – С. 22– 28.
- 35 Dwivedi R. D., Soni A. K., Goel R. K., et al. Fracture toughness of rocks under sub-zero temperature conditions, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(8) – P. 1267–1275.
- 36 Aoki K., Hibiya K., Yoshida T. Storage of refrigerated liquefied gases in rock caverns: characteristics of rock under very low temperatures, Tunnelling and Underground Space Technology, 1990, 5(4) – P. 319–325.
- 37 Cai C., Li G., Huang Z., et al. Experimental study of the effect of liquid nitrogen cooling on rock pore structure, Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 21(11)– P. 507-517.
- 38 Григорьева К.В., Караваев Н.М. Влияние условий щелочной экстракции углей на состав гуминовых кислот // Доклады АН СССР, 1969, т.188, №1, с.160-169
- 39 Powers, T.C. 1955. Basic considerations pertaining to freezing and thawing test, Am soc. Test. Mater.proc., 55, 1132-55
- 40 А.Г. Черняховский. Современные коры выветривания. /А.Г. Черняховский / Москва «Наука» 1991. 209 с.

- 41 Хантингтон Э. (1922), Климатические изменения, их природа и причины. Нью-Хейвен, Коннектикут: Издательство Йельского университета.
- 42 Н.Г. Бедрань. «Обогащение углей». Учебник для вузов. — 2-е издание. — М.: Недра, 1988. — 206 с.
- 43 Qin L., Zhai C., Liu S., Xu J. Factors controlling the mechanical properties degradation and permeability of coal subjected to liquid nitrogen freeze-thaw. *Scientific Reports*, 2017 Vol. 7, no 1, pp. 3675 DOI: 10.1038/s41598-017-04019-7.
- 44 Cai C., Li G., Huang Z., Tian S., Shen Z., Fu X. Experiment of coal damage due to supercooling with liquid nitrogen. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015 Vol. 22, pp. 42—48.
- 45 Cai C., Gao F., Li G., Huang Z., Hou P. Evaluation of coal damage and cracking characteristics due to liquid nitrogen cooling on the basis of the energy evolution laws. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016 Vol. 29, pp. 30—36.
- 46 ,Qin L., Zhai C., Liu S., Xu J., Yu G., Sun Y. Changes in the petrophysical properties of coal subjected to liquid nitrogen freeze-thaw . A nuclear magnetic resonance investigation. *Fuel*, 2017 Vol. 194, pp. 102—114.
- 47 Zhai C., Wu S., Liu S., Qin L., Xu J. Experimental study on coal pore structure deterioration under freeze—thaw cycles. *Environmental Earth Sciences*, 2017. Vol. 76, no 15, pp. 507
- 48 Liu S.Q., Sang S.X., Liu H.H., Zhu Q.P. Growth characteristics and genetic types of pores and fractures in a high-rank coal reservoir of the southern Qinshui basin. *Ore Geology Reviews*, 2015. Vol. 64, no 1, pp. 140—151.
- 49 Yu Y., Liang W., Hu Y., Meng Q. Study of micro-pores development in lean coal with temperature. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012. Vol. 51, pp. 91—96.
- 50 Sun Y., Zhai C., Qin L., Xu J., Yu G. Coal pore characteristics at different freezing temperatures under conditions of freezing—thawing cycles. *Environmental Earth Sciences*, 2018. Vol. 77, no 13, pp. 525.

- 51 Epshtein, S. A., Nikitina, I. M., Agarkov, K. V., Nesterova, V. G., & Minaev, V. I. (2019). Effects of cyclic freezing and thawing on coals quality indices. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 6, 5–18.
- 52 Epshtein, S. A., Kossovich, E. L., Gavrilova, D. I., & Agarkov, K. V. (2019). Effects of cyclic freeze-thawing of coals on their ability to oxidize. *Gornyi Zhurnal*, (7), 71–76.
- 53 Deng J., Xiao Y., Li Q., Lu J., Wen H. Experimental studies of spontaneous combustion and anaerobic cooling of coal // *Fuel*, 2015. Vol. 157, pp. 261—269.
- 54 Агарков К. В., Эпштейн С. А., Коссович Е. Л., Добрякова Н. Н. Влияние условий замораживания-размораживания углей на их гранулометрический состав и механическую прочность // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2021. — № 6. — С. 72–83. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_6_0_72.
- 55 Хрисанфова А. И., Литвинов В. Л. Технология хранения углей и мероприятия по сокращению потерь топлива. — М.: Недра, 1970. — 192 с.
- 56 Мирошниченко Д. В., Десна Н. А., Кафтан Ю. С. Исследование процесса окисления углей в промышленных условиях. Сообщение 4. Температура угля в штабеле // *Кокс и химия*. — 2015. — № 2. — С. 2–8.
- 57 Лазаров Л., Ангелова Г. Структура и реакции углей. — София: Изд-во Болгарской АН, 1990. — 232 с
- 58 Федоров, В. И. Оценка изменения гранулометрического состава низкометаморфизированных углей при длительном хранении / В. И. Федоров, В. Л. Гаврилов // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. — 2021. — № 12-1. — С. 223-232. — DOI 10.25018/0236_1493_2021_121_0_223. — EDN QHGVNF.
- 59 Freeze-thaw conditions effects on coals grain size composition and resistance to breakage / K. V. Agarkov, S. A. Epshtein, E. L. Kossovich, N. N. Dobryakova // *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*. — 2021. — No 6. — P. 72-83. — DOI 10.25018/0236_1493_2021_6_0_72. — EDN DABYIK.
- 60 Хранение угля и торфа на ТЭС. Классификация углей по пригодности к хранению. М.: Энергоиздат, 1982. — Режим доступа:

- <https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/hranenie-uglya-i-torfa-na-tes/Page-10.html> (дата обращения 10.10.2022 г.)
- 61 Приложение №4 к протоколу Правления ГКЦ-РЭК РС(Я) от 22.12.2010г. №172-пр «Расчет баланса топлива по Мини-ТЭЦ п. Депутатский Усть-Янского улуса ОАО «Сахаэнерго» на 2011г.».
- 62 Десна, Н. А. Использование окисленных углей при коксовании (обзор) / Н. А. Десна, Д. В. Мирошниченко // Кокс и химия. – 2011. – № 5. – С. 02-09. – EDN NTSPUJ.
- 63 Химия и технология угля: учебное пособие для вузов по специальности "Обогащение полезных ископаемых". - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1969. - 237 с.
- 64 Jun Deng, Yang Xiao, Qingwei Li, Junhui Lu, Hu Wen. Experimental studies of spontaneous combustion and anaerobic cooling of coal // Fuel, 2015, vol. 157, p. 261–269.
- 65 Инструкция по хранению каменноугольного топлива на теплоэнергетических предприятиях местных советов депутатов трудящихся РСФСР № 65 от 14 февраля 1974 г. с изменениями от июля 2011 г. Министерство жилищно-коммунального хозяйства РСФСР. Режим доступа:
http://www.libussr.ru/doc_ussr/usr_8255.htm (дата обращения 10.10.2022 г.).
- 66 . РД 34.44.101-96. СО 34.44.101-96. Типовая инструкция по хранению углей, горючих сланцев и фрезерного торфа на открытых складах электростанций // РАО ЕЭС России. — М.: СПО ОРГРЭС, 1996. — 37 с.
- 67 Winkler E M. (1968) Frost damage to stone and concrete: geological considerations. *Engineering Geology*, 2(5): 315-323.
- 68 Хантингтон Э. и Вишер С. С. (1922), Климатические изменения, их природа и причины. Нью-Хейвен, Коннектикут: Издательство Йельского университета.
- 69 Finnie I, Cooper G A, Berlie J. (1979) Fracture propagation in rock by transient cooling. *38 International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, 16(1): 3911-21.

- 70 Nicholson D T, Nicholson F H. (2000) Physical deterioration of sedimentary rocks subjected to experimental freeze-thaw weathering. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(12): 1295-421307
- 71 Lin J, Ren T, Wang G, et al. (2018) Simulation investigation of N₂-injection enhanced gas drainage: model development and identification of critical parameters. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 55: 30-41.
- 72 Dwivedi R D, Soni A K, Goel R K, et al. (2000) Fracture toughness of rocks under sub-zero temperature conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(8): 481267-1275.
- 73 Aoki K, Hibiya K, Yoshida T. (1990) Storage of refrigerated liquefied gases in rock caverns: characteristics of rock under very low temperatures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 5(4): 319-325.
- 74 Cai C, Li G, Huang Z, et al. (2014) Experimental study of the effect of liquid nitrogen cooling on rock pore structure. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 21(11): 507-517.
- 75 Методическое руководство по изучению инженерно-геологических условий рудных месторождений при их разведке / М-во природных ресурсов Российской Федерации, Всероссийский науч.-исслед. ин-т минерального сырья им. Н. М. Федоровского; сост.: В. И. Кузькин, Л. А. Ярм, М. В. Кочетков]. - Москва : РИЦ ВИМСа, 2001. - 153 с.
- 76 Хохолов, Ю. А. Математическое моделирование теплообменных процессов хранения мерзлого угля на открытых складах / Ю. А. Хохолов, В. Л. Гаврилов, В.И. Федоров // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 6. – С. 172-182. – DOI 10.15372/FTPRPI20190617. – EDN PZBGDC.
- 77 Кузькин В.И., Ярм Л.А., Кочеткова М.В. Техногенное выветривание на рудных месторождениях / В.И. Кузькин, Л.А. Ярм, М.В. Кочеткова. - М. : МГП "Геоинформмарк", 1993. - 24 с.
- 78 Raja Sen, Sunil K. Srivastava, Madan Mohan Singh. Aerial oxidation of coal-analytical methods, instrumental techniques and test methods: A survey // *Indian J. Chem. Technol.*, 2009, vol. 16, p. 103–135.

- 79 Qian Zhu. Coal sampling and analysis standards (Analytical review) // IEACCC Ref: CCC/235, IEA Clean Coal Centre, April 2014, 123 p
- 80 Перспективы и проблемы использования современной техники микро- и наноиндентирования для диагностики механических свойств углей / Е. Л. Коссович, С. А. Эпштейн, В. Л. Шкуратник, М. Г. Минин // Горный журнал. – 2017. – № 12. – С. 28-30. – DOI 10.17580/gzh.2017.12.05. – EDN YMEIGN.
- 81 On using cyclic nanoindentation technique to assess coals propensity to fine dust formation / E. L. Kossovich, S. A. Epshtein, M. D. Golubeva, V. A. Krasilova // Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). – 2021. – No 5. – P. 112-121. – DOI 10.25018/0236_1493_2021_5_0_112. – EDN VKQVRP.
- 82 ASTM D5263-15. Standard Test Method for Determining the Relative Degree of Oxidation in Bituminous Coal by Alkali Extraction // Gaseous Fuels; Coal and Coke, 2015, vol. 05.06, 3 p.
- 83 Мамбетов А.Ш. Геоакустические методы изучения породного массива / А.Ш. Мамбетов, Ш.А. Мамбетов, - Фрунзе: Илим, 1978. - 174 с.
- 84 Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. / Ермолов И.Н -М.: Машиностроение,1981, 240с
- 85 Буянова, Д. С. Особенности электрометрического контроля трещиноватости массива горных пород вокруг подземных выработок / Д. С. Буянова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 6. – С. 227-232. – EDN QJBYOG.
- 86 Haibo Wu, Shouhua Dong, Donghui Li, Yaping Huang, Xuemei Qi Experimental study on dynamic elastic parameters of coal samples // International Journal of Mining Science and Technology, 2015, vol. 25, no. 3, pp. 447—452
- 87 Jonathan P. Mathews^a, Quentin P. Campbell^b, Hao Xuc, Phillip Halleck. A review of the application of X-ray computed tomography to the study of coal // Fuel, 2017, pp. 10—24
- 88 . Zhang G., Ranjith P.G., Perera M.S.A., Haque A., Choi X., Sampath. Characterization of coal porosity and permeability evolution by demineralisation using image

- processing techniques. A micro-computed tomography study // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, pp. 384—396.
- 89 Ядрищенский, Георгий Евгеньевич. Оценка воздействия криогенного выветривания на морозостойкость и физико - механические свойства скальных пород : (На прим. Удокан. месторождения меди) : Автореф. дис. на соиск. учен. степ. к.т.н. : Спец. 05.15.11 / Читин. гос. техн. ун-т. - Чита, 1997. - 25 с
 - 90 Taheri A., Squires J., Meng Z., Zhang Z. Mechanical properties of brown coal under different loading conditions // *International Journal of Geomechanics*. 2017, Vol. 17, no 11, Article number 06017020.
 - 91 Шкуратник В. Л., Данилов В. Н. Об использовании поверхностных волн Рэлея для определения упругих параметров горных пород // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. — 2019. — № 3. — С. 48–54.
 - 92 Njiekak G., Schmitt D. R. Effective stress coefficient for seismic velocities in carbonate rocks: effects of pore characteristics and fluid types // *Pure and Applied Geophysics*. 2019, Vol. 176, no 4, pp. 1467—1485.
 - 93 Wang Z., Wang R., Li T., Zhao M. The combined effects of pore structure and pore fluid on the acoustic properties of cracked and vuggy synthetic rocks // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2017, Vol. 156, pp. 202—211.
 - 94 Kłopotowska A. Ultrasonic constraint of the microfracture anisotropy of flysch rocks from the Podhale Synclinorium (Poland) // *International Journal of Earth Sciences*. 2018, Vol. 107, no 6, pp. 1941—1953.
 - 95 Szewczyk D., Bauer A., Holt R. M. Stress-dependent elastic properties of shales - laboratory experiments at seismic and ultrasonic frequencies // *Geophysical Journal International*. 2018, Vol. 212, no 1, pp. 189—210.
 - 96 Khazanehdari J., Sothcott J. Variation in dynamic elastic shear modulus of sandstone upon fluid saturation and substitution // *Geophysics*. 2003, Vol. 68, no 2, pp. 472—481.
 - 97 Qin L., Zhai C., Liu S., Xu J., Tang Z., Yu G. Failure Mechanism of Coal after Cryogenic Freezing with Cyclic Liquid Nitrogen and Its Influences on Coalbed Methane Exploitation, *Energy and Fuels*, 2016, 30(10) – P. 8567-8578.

- 98 Qin L., Zhai C., Liu S., Xu J. Mechanical behavior and fracture spatial propagation of coal injected with liquid nitrogen under triaxial stress applied for coalbed methane recovery, *Engineering Geology*, 2018, 233– P. 1-10
- 99 Novikov E.A., Shkuratnik V.L., Zaytsev M.G., Oshkin R.O. Changes in properties and state of coal exposed to freeze-thaw weathering: Evidence from thermally induced acoustic emission, *Earth's Cryosphere*, 201822(4), – P. 76-85
- 100 Hayat M. B., Ur Rehman A., Ali D., Saleem A., Mustafa N. Developing Empirical Models for Uniaxial Compressive Strength Prediction by Using Non-Destructive Test Results, *Journal of Mining Science*, 2019, 55(6), — P. 883—892.
- 101 Qin L., Zhai C., Liu S., Xu J. Factors controlling the mechanical properties degradation and permeability of coal subjected to liquid nitrogen freeze-thaw, *Scientific Reports*, 2017, 7(1) – P. 3675. DOI: 10.1038/s41598-017-04019-7.
- 102 Шкуратник В. Л., Николенко П. В., Кошелев А. Е. Зависимость скорости распространения и амплитуды продольных упругих волн от напряжений при различных режимах нагружения образцов каменного угля // ФТПРПИ. — 2016. — № 5. — С. 48 – 53.
- 103 Podymova N.B., Karabutov A.A., Cherepetskaya E.B. Laser optoacoustic method for quantitative nondestructive evaluation of the subsurface damage depth in ground silicon wafers. *Laser Physics*, 2014, Vol. 24, no. 8, pp. 086003(1)–086003(5).
- 104 Kravcov A., Svoboda P., Konvalinka A., Cherepetskaya E.B., Karabutov A.A., Morozov D.V., Shibaev I.A. Laser-ultrasonic testing of the structure and properties of concrete and carbon fiberreinforced plastics. *Key Engineering Materials*, 2017, 722, pp. 267—272.
- 105 Karabutov A.A., Cherepetskaya E.B., Podymova N.B. Laser-ultrasonic measurement of local elastic moduli. *NDT in Progress 2015. 8th International Workshop of NDT Experts, Proceedings*, 2015, pp. 75—78.
- 106 Santos C.A., Urdaneta V., Jaimes G., Trujillo L. Ultrasonic spectral and complexity measurements on brine and oil saturated Rocks, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2010, 43(3) – P. 351-359

- 107 Shamina O.G., Palenov A.M. Elastic wave spectra and fracture, *Izvestiya - Physics of the Solid Earth*, 2000, 36(3) – P. 196-203.
- 108 Назаров С.А. Аномалии рассеяния акустических волн вблизи точек отсечки непрерывного спектра (обзор) // *Акустический журнал*. – 2020. – № 66(5). – С. 489–508.
- 109 Скрипченко, Г. Б. Структура, свойства и использование антрацитов Донецкого бассейна / Г. Б. Скрипченко // *Химия твердого топлива*. – 2010. – № 2. – С. 3-13. – EDN LAJKOF.
- 110 Марочный состав углей и их рациональное использование : Справочник / И. В. Еремин, Т. М. Броневец; Под ред. В. Ф. Череповского. - М. : Недра, 1994. – 253 с
- 111 Антрациты России и мира = Anthracites of Russia and the World : Справочник / В. И. Вялов, М. В. Голицын, А. М. Голицын; Под ред. В. Ф. Череповского. - М. : Недра, 1998. - 243,
- 112 Антрациты России и мира = Anthracites of Russia and the World : Справочник / В. И. Вялов, М. В. Голицын, А. М. Голицын; Под ред. В. Ф. Череповского. - М. : Недра, 1998. – 243 с.
- 113 Петрография и физические свойства углей / И. В. Еремин, В. В. Лебедев, Д. А. Цикарев. - М. : Недра, 1980. - 263 с.
- 114 Брылева, М. С. Сравнительный анализ углей Апсатского и Читкандинского месторождений / М. С. Брылева, Е. Е. Барабашева // *Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов : Сборник статей*, Чита, 27–30 ноября 2017 года. – Чита: Забайкальский государственный университет, 2017. – С. 82-87. – EDN YLXYJU.
- 115 Брылева, М. С. Элементный состав углей Апсатского и Читкандинского угольных месторождений (Забайкальский край) / М. С. Брылева, Е. Е. Барабашева // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2018. – № 2. – С. 130-139. – DOI 10.25018/0236-1493-2018-2-0-130-139. – EDN YNHTRP.

- 116 Никитина, Я. В. Вещественный состав и сравнительная характеристика пластов углей бородинского месторождения // Молодежь и наука: сборник материалов IX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 385-летию со дня основания г. Красноярска [Электронный ресурс]. — Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2013.
- 117 Xu X.-L., Zhang R., Dai F., Yu B., Gao, M.-Z., Zhang Y.-F. Effect of coal and rock characteristics on ultrasonic velocity // Meitan Xuebao. Journal of the China Coal Society. 2015, Vol. 40, no 4, pp. 793—800.
- 118 Zeroug S., Sinha B. K., Lei T., Jeffers J. Rock heterogeneity at the centimeter scale, proxies for interfacial weakness, and rock strength-stress interplay from downhole ultrasonic measurements // Geophysics. 2018, Vol. 83, no 3, pp. D83—D95.
- 119 Dambly M. L. T., Nejati M., Vogler D., Saar M. O. On the direct measurement of shear moduli in transversely isotropic rocks using the uniaxial compression test // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2019, Vol. 113, pp. 220—240.
- 120 Gorbatshevich F. F. Acoustic polarization method for determining elastic symmetry and constants of anisotropy in solid media // Ultrasonics, 1999, Vol. 37, no 4, pp. 309—319.
- 121 Shkuratnik V. L., Nikolenko P. V., Koshelev A. E. Stress dependence of elastic p-wave velocity and amplitude in coal specimens under varied loading conditions // Journal of Mining Science. 2016, Vol. 52, no 5, pp. 873—877.
- 122 Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / Под общ. ред. И.Н. Ермолова. — М.: Машиностроение, 1986 — 280 с.
- 123 Пьезокерамика - 2-е изд., перераб. - Москва : Энергия, 1972. - 288 с
- 124 Gorbatshevich F. F. Acoustopolariscopy. A new direction in investigation of anisotropic heterogeneous media // Acta Acustica (Stuttgart). 2003, Vol. 89, pp. 122—123.
- 125 Gorbatshevich F. F. Physical principles and instruments for the acoustic polarization method of determining elastic anisotropy in rock samples // Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1987, Vol. 91, no 2, pp. 493—500.

- 126 Акустополарископия горных пород : (Метод и результаты) : автореферат дис. ... доктора технических наук: 04.00.12 / ВНИИ разведочной геофизики. - Санкт-Петербург, 1992. - 33 с.
- 127 Santos, C.A., Urdaneta, V., Jaimes, G., Trujillo, L. Ultrasonic spectral and complexity measurements on brine and oil saturated Rocks // 2010 Rock Mechanics and Rock Engineering 43(3), pp. 351-359
- 128 Abdmutalib, A., Abdullatif, O., Abdelkarim, A., Yousif, I. Factors influencing acoustic properties of carbonate rocks: Examples from middle Jurassic carbonates, Central Saudi Arabia 2019 Journal of African Earth Sciences 150, c. 767-782
- 129 Wu, H., Zhang, P., Dong, S., Huang, Y., Zhang, M. Brittleness index analysis of coal samples 2019 Acta Geophysica 67(3), pp. 789-797
- 130 Santos, C.A., Urdaneta, V., Jaimes, G., Trujillo, L. Ultrasonic spectral and complexity measurements on brine and oil saturated Rocks // 2010 Rock Mechanics and Rock Engineering 43(3), pp. 351-359
- 131 Shamina, O.G., Palenov, A.M. Elastic wave spectra and fracture // 2000 Izvestiya - Physics of the Solid Earth 36(3), pp. 196-203
- 132 Remy, J.-M., Bellanger, M., Homand-Etienne, F. Laboratory velocities and attenuation of P-waves in limestones during freeze-thaw cycles//1994, Geophysics 59(2), pp. 245-251
- 133 Tribikram Kundu. Mechanics of Elastic Waves and Ultrasonic Nondestructive Evaluation
- 134 Qin, L., Zhai, C., Liu, S., Xu, J. Factors controlling the mechanical properties degradation and permeability of coal subjected to liquid nitrogen freeze-thaw 2017 Scientific Reports 7(1), 4019
- 135 Pan, J., Meng, Z., Hou, Q., Ju, Y., Cao, Y. Coal strength and young's modulus related to coal rank, compressional velocity and maceral composition 2013 Journal of Structural Geology 54, pp. 129-135
- 136 Wang, P., Xu, J., Fang, X., Wang P., Zheng, G., Wen, M. Ultrasonic time-frequency method to evaluate the deterioration properties of rock suffered from freeze-thaw weathering, 2017, Cold Regions Science and Technology, 143, pp. 13-22

- 137 Шкурантик В.Л. Горная геофизика, Ультразвуковые методы, Учебное пособие, -М.: МГИ, 1990, -104 с.
- 138 Бутырский, Е. Ю. Преобразование Гильберта и его обобщение / Е. Ю. Бутырский // Научное приборостроение. – 2014. – Т. 24. – № 4. – С. 30-37. – EDN TAGLXX.
- 139 ASTM Standart E 1495-02. Standart Guide for Acusto-Ultrasonic Assement of Composites, Laminates and Bonded Joints.
- 140 Shamina, O.G., Palenov, A.M. Elastic wave spectra and fracture // 2000 Izvestiya - Physics of the Solid Earth 36(3), pp. 196-203
- 141 Дучков А. Д., Дугаров Г. А., Дучков А. А., Дробчик А. Н. Лабораторные исследования скорости и поглощения ультразвуковых волн в песчаных образцах, содержащих воду/лед, гидраты метана и тетрагидрофурана // Геология и геофизика. – 2019. – Т. 60. – № 2. – С. 230-242.
- 142 Коссович Е. Л., Добрякова Н. Н., Эпштейн С. А., Белов Д. С. Определение механических свойств микрокомпонентов углей методом непрерывного индентирования // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 5. – С. 84–91.
- 143 Sarout J. Impact of pore space topology on permeability, cut-off frequencies and validity of wave propagation theories, Geophysical J. Int., 2012, 189(1). — P. 481 – 492.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
ДОКУМЕНТЫ О ПРАКТИЧЕСКОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ
КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР
ИМ. АКАДЕМИКА Н.В. МЕЛЬНИКОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИПКОН РАН)**

111020, Москва, Е-20, Кроковский тупик, д. 4
Тел.: +7 (495) 360-89-60, Эл. почта: ipkon-dir@ipkonran.ru
www.ipkonran.ru, www.ipkonran.ru
ИНН 7722013467, КПП 772201001

26.10.2022 № 117-01-05/482

На № _____

[Об использовании результатов
диссертационной работы]

Председателю диссертационного
совета НИТУ «МИСиС»
проф., д.т.н. С.А. Никулину
Ленинский пр-т., д. 4
г.Москва, 119991

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы Севагиной
Полины Сергеевны на тему: «Обоснование и разработка активных
ультразвуковых способов оценки поврежденности углей под влиянием
циклического замораживания-оттаивания», представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Разработанная по результатам диссертационной работы Севагиной П.С.
«Методика оценки склонности углей к дезинтеграции после воздействия
циклического замораживания-оттаивания» рассмотрена и одобрена в ИПКОН
РАН.

Контроль степени дезинтеграции углей, подвергшихся многократному
замораживанию-оттаиванию, позволит оперативно оценивать качество сырья и
вносить коррективы в условия хранения и транспортировки угольной
продукции.

Результаты диссертационной работы были использованы при проведении
научно-исследовательских работ по теме FMMS-2021-0004 «Развитие теории
многофазных гео- и газодинамических процессов в техногенно изменяемом
газонасыщенном углепородном массиве» для определения закономерностей
деформирования и разрушения угольных пластов и массива вмещающих
горных пород при изменении внешних термодинамических и физико-
механических условий, а также при исследовании механохимических и физико-
химических процессов в угольных пластах.

Директор ИПКОН РАН
академик

 В.Н. Захаров