

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

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

Автореферат диссертации  
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, доцент кафедры ФизГео  
Николенко Петр Владимирович

Москва, 2022

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Наибольшее количество действующих месторождений угля расположены в северных регионах страны, преимущественно на территориях Крайнего Севера и Арктики. 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 степени нарушенности углей 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, связанных с теоретическим, методическим и аппаратным характером, которые направлены на повышение эффективности ультразвуковых измерений и совершенствование методики испытаний образцов угля, подвергшихся ЦЗО за счет использования различных параметров ультразвуковых сигналов, являются актуальными. Решение таких задач позволит получить детальную информацию о структуре нарушений в образцах угля, также о причинах, приводящих к их развитию.

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

**Цель работы** состоит в установлении 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** заключается в использовании динамических и спектральных характеристик ультразвуковых импульсов для анализа дефектообразования в образцах угля различных видов под воздействием циклического замораживания-оттаивания.

**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 в условиях 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.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:**

- удовлетворительным совпадением установленных в ходе 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 апробированных, хорошо зарекомендовавших себя методов испытаний и обработки экспериментальных данных при проведении

исследований, а также средств измерений (СИ) с высокими метрологическими характеристиками;

- удовлетворительной сходимостью результатов контроля исследованных образцов при применении различных методов ультразвуковых исследований.

**Методы исследований** 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.

**Научная новизна работы заключается в:**

- установлении закономерностей изменения информативных параметров при использовании активных ультразвуковых методов контроля под влиянием циклического замораживания-оттаивания на образцы угля;

- 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.

**Практическая значимость работы и реализация полученных 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.

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

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В *первой главе* проанализировано современное состояние проблемы, связанной с оценкой ЦЗО на структуру, свойства и состояние углей различных видов, а также роль, которую играют в её решении геофизические методы, в том числе, применение акустических методов для оценки и прогнозирования степени разрушения геоматериалов под температурным воздействием.

Отмечена роль в становлении и развитии этих методов таких отечественных учёных, как Горбацевича Ф.Ф., Дучкова А. Д., Дугарова Г. А, Захарова Е.В., Куляндина Г.А., Назаровой Л.А., Николенко П.В., Новикова Е.А, Сукнева С.В., Федоровой Л.Л., Черепецкая Е.Б, Шкуратника В.Л., Эпштейн С.А., Ямщикова В.С. и др., зарубежных ученых Bellanger M, Cai C, Hayat M. B, Homand-Etienne F., Li G, Li X, Liu S, Nicholson D. T, Remy J. M, Santos C., Sarout J. Qin L, Urdaneta V, Winkler E M., Wu M, Zhai C. и др.

В главе предоставлена характеристика выветривания при ЦЗО как одного из процессов природной и техногенной экзодинамики. Рассмотрены вопросы влияния циклического низкотемпературного воздействия на структуру, свойства и состояние угля. Проанализированы достоинства и недостатки различных способов оценки нарушенности геоматериала, позволяющие определять границы зон выветривания в результате ЦЗО и пространственно-временную изменчивость структуры и свойств углей в данных зонах. В результате сделаны выводы о перспективности использования геофизических методов для изучения нарушенности геоматериалов ультразвуковыми методами, а с другой стороны, о необходимости совершенствования имеющейся приборной и методической базы ультразвуковых методов исследования влияния ЦЗО на угли.

На основании выполненного анализа состояния исследуемой проблемы, в данной главе, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования:

1. Обоснование принципов, 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.

**Вторая глава** посвящена методическому и аппаратному обеспечению применения активных ультразвуковых методов для оценки нарушенности образцов угля под влиянием факторов выветривания.

При постановке экспериментов были использованы образцы следующих видов углей: антрацита (месторождения Восточного Донбасса), каменного (Апсатское месторождение) и бурого углей (Бородинское месторождение), характеристики которых представлены в таблице 1.

Подготовка образцов к испытаниям состояла в сухом шлифовании поверхностей до создания двух параллельных граней.

В главе рассмотрен методический подход, заключающийся в использовании амплитуды первого вступления линейно поляризованных поперечных упругих волн ( $A_S$ ) и их спектров  $G(A_S)$  для исследования углей и, в частности, динамики их поврежденности. Подход предполагает возбуждение и регистрацию поперечных волн в образцах углей, при этом в каждом последующем измерении плоскость поляризации  $S$ -волны поворачивают на некоторый фиксированный угол. Таким образом, в результате измерений получают полярную диаграмму распределения информативных параметров (например, амплитуды первого вступления).

Таблица 1 – Основные характеристики исследуемых углей

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

Особого внимания заслуживает рассмотрение механизма передачи энергии ультразвуковых поперечных колебаний на границах «излучающий преобразователь - уголь» и «уголь – приемный преобразователь».

Традиционные ультразвуковые измерения с использованием продольных волн предполагают использование в качестве связующей среды воду или различные минеральные смазки. Подобные среды не подходят для передачи  $S$ -волн из-за низкой сдвиговой упругости в ультразвуковом диапазоне частот. Оригинальная методика, разработанная Ф.Ф. Горбацевичем, предполагала использование высоковязких растворов некристаллизованного полисахарида. Однако пробные испытания показали, что использование такой смазки приводит к ее проникновению в поры и трещины на поверхности угля, что значительно изменяет его акустические характеристики. После заморозки и оттаивания подобная смазка разрушает приповерхностный слой образца. При исследовании акустических свойств угля в условиях циклического замораживания-оттаивания оказалось принципиально необходимым полностью отказаться от использования жидких связующих сред для обеспечения надлежащего акустического контакта образца с преобразователями.

В качестве протекторов пьезоэлектрических преобразователей на испытательном стенде была применена наждачная бумага. Для установления оптимальных параметров размера абразива были проведены лабораторные исследования на специализированном лабораторном стенде. Стенд (рисунок 1) состоял из акустических преобразователей поперечных волн, закрепленных на раме так, чтобы плоскости поляризации излученной и принятой  $S$ -волны совпадали. Преобразователи - широкополосные с центральной частотой  $f = 600$  кГц. На раме также предусмотрено устройство ориентирования образца, позволяющее вращать образец вокруг вертикальной оси на  $360^\circ$  с шагом  $1^\circ$ .

С задающего генератора на излучатель поступал периодический сигнал прямоугольной формы (меандр) амплитудой 300 В. Проходящий через образец сигнал принимался пьезопреобразователем и поступал на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) Е20-10, который был подключен к персональному компьютеру (ПК). Частота дискретизации АЦП составляла 5 МГц. Длина записи сигнала на ПК составила 1024 отсчета или 205 мс.

Определение  $V_s$  и  $A$  происходило в автоматизированном режиме в результате осреднения результатов 50 последовательных измерений. В ходе измерений прижимное давление пьезопреобразователей к образцу поддерживалось постоянным за счет использования цифрового динамометрического датчика на прижимном винте.

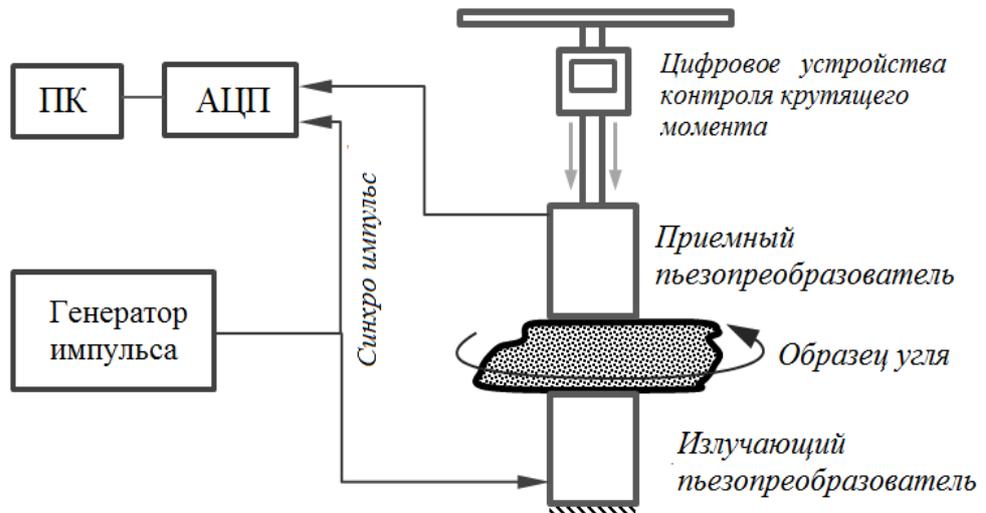


Рисунок 1 — Лабораторный стенд для ультразвуковых исследований

На рисунке 2 на примере образца антрацита представлены волновые формы зарегистрированных в ходе исследований сигналов с обозначенным первым вступлением поперечных волн ( $S$ -волн). В качестве контактной среды использовались высоковязкий раствор некристаллизованного полисахарида, а также наждачная бумага с различной зернистостью (600 мкм (P30), 250 мкм (P60), 75 мкм (P180) и 35 мкм (P400)). Маркировка наждачной бумаги указана согласно ГОСТ 52381-2005.

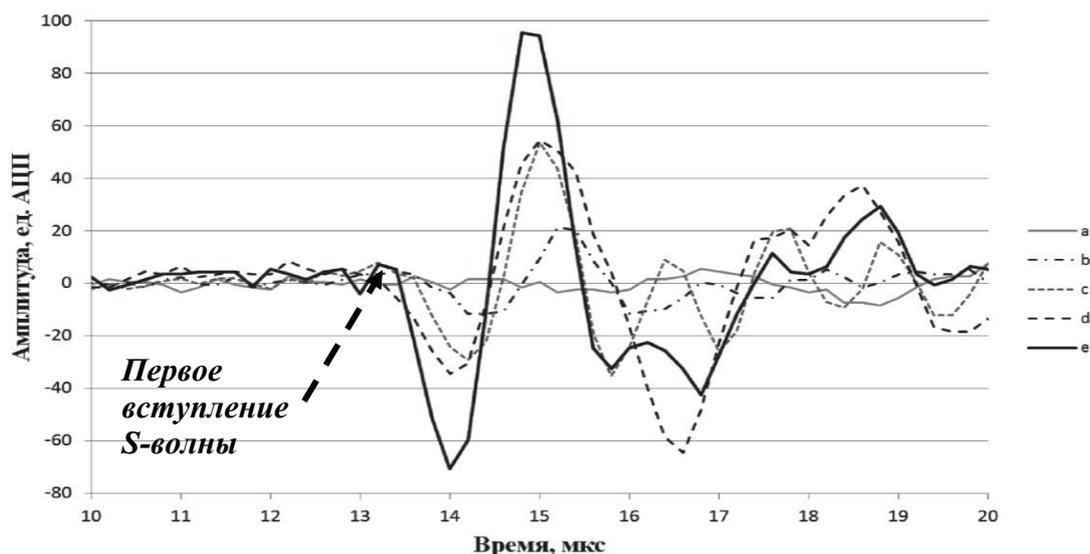


Рисунок 2 — Волновые формы зарегистрированных сигналов с использованием в качестве контактной среды между пьезопреобразователями и образцом антрацита наждачной бумаги Р30 (а), Р60(б), Р180 (с), Р400 (д), и высоковязкого раствора некристаллизованного полисахарида (е)

По результатам анализа рисунке 2 отмечено, что уровень амплитуды первой  $S$  полуволны зависит от зернистости наждачной бумаги. При этом с увеличением зернистости уровень амплитуды растет.

В дополнение к оценке амплитуды первого вступления поперечной волны производился анализ такого распространенного параметра как соотношение сигнал/шум. На рисунке 3 представлены примеры вычисления указанного параметра для разных типов углей и различных контактных условий. Из рисунка 3 видно, что наилучшее соотношение сигнал/шум наблюдается при использовании некристаллизованного полисахарида, однако по причинам, указанным выше, его применение для исследования углей при ЦЗО невозможно. Оптимального контакта удастся достичь при использовании наждачной бумаги, размер зерна абразива которой составляет: 35-75 мкм для антрацита и каменного угля, 75-250 мкм для бурого угля.

В качестве дополнительной демонстрации эффективности использования абразива для обеспечения акустического контакта на рисунке 4 приведены полярные диаграммы, полученные последовательным прозвучиванием антрацита при различных углах поворота образца. Из рисунка 4 видно, что при использовании абразива зернистостью Р400 свойства образца не изменяются, о чем свидетельствует замкнутый характер полярной диаграммы. При использовании некристаллизованного полисахарида напротив, полярная диаграмма оказывается разомкнутой, что указывает на деструктивный характер контроля. Неравенство значений  $A_s(0^\circ)$  и  $A_s(360^\circ)$  в данном случае связано с постепенным проникновением

вязкой контактной среды в поры и трещины приповерхностного слоя образца, что значительно изменяет его акустические свойства. При реализации ЦЗО это также может привести к частичному разрушению приповерхностного слоя образца угля.

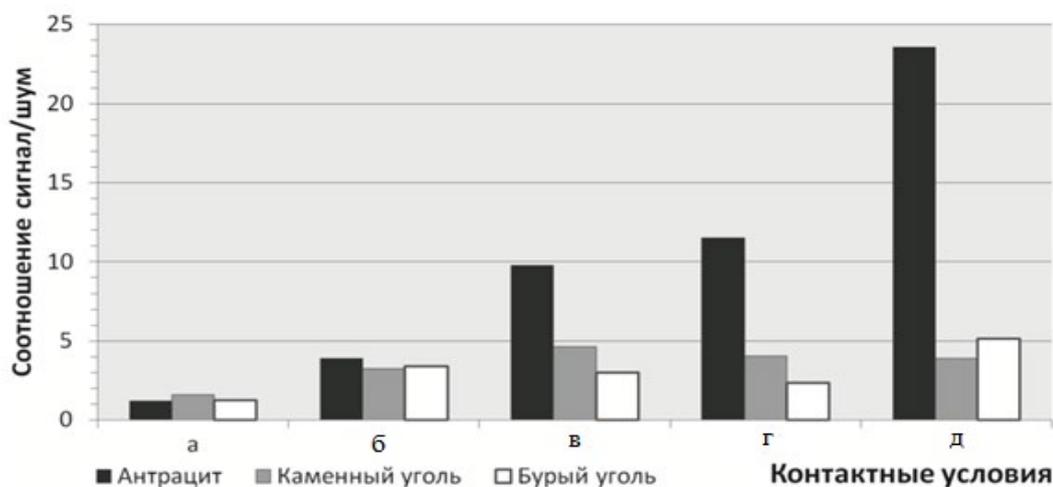


Рисунок 3 — Соотношение Сигнал/Шум для образцов антрацита, каменного и бурого углей при использовании для обеспечения контактных условий: наждачной бумаги с зернистостью Р30 (а), Р60 (б), Р180 (в), Р400 (г) и высоковязкого раствора некристаллизованного полисахарида (д)

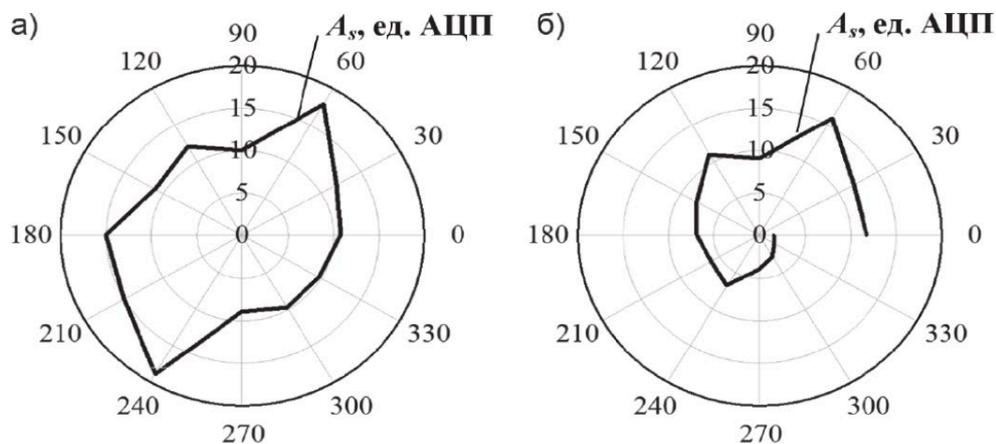


Рисунок 4 — Зависимость амплитуды  $A_s$  от углов поворота образца угля при использовании в качестве контактной среды наждачной бумаги зернистостью (Р400) (а) и высоковязкого раствора некристаллизованного полисахарида (б)

На основании выполненного анализа результатов лабораторных ультразвуковых исследованиях на образцах, в части обеспечения контактных условий, установлено следующее:

- Использование жидких контактных сред приводит к искажению результатов ультразвуковых исследований по причине изменения свойств поверхностного слоя образца. Наиболее очевидны данные изменения при

многократных повторениях испытаний, а также при наличии температурных воздействий на образец.

- Использование наждачной бумаги вместо жидких контактных сред позволяет исключить влияние на поверхностный слой образца, что обеспечивает эффективность и правильность результатов измерений, особенно при многократных повторениях;

- Достигаемое при сухом контакте соотношение сигнал/шум находится на достаточном уровне для надежной регистрации данных измерений.

Оценка влияния количества циклов замораживания-оттаивания на степень поврежденности образцов углей производилась путем лабораторных исследований в соответствии со следующим алгоритмом.

Перед началом циклического термического воздействия на всех образцах экспериментально определялись значения  $V_s$  и  $A_s$  с шагом  $\theta = 30^\circ$  с целью создания массива данных о первичном состоянии углей (нулевой цикл) с использованием лабораторного стенда, описанного выше. Результаты измерений представлялись в виде полярных диаграмм распределения информативного параметра в функции от угла поворота. Далее образцы помещались в программируемую климатическую камеру «КТХВ-150», где производилось их циклическое замораживание-оттаивание в температурном диапазоне от  $-40^\circ\text{C}$  до  $+20^\circ\text{C}$ . Повторные исследования акустических свойств образцов производились после 1, 3, 6, 10 и 15 циклов замораживания-оттаивания.

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

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

где  $n$  – количество измерений при различных углах  $\theta$ .

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  $k_{c.d.}$

$$k_{c.d.} = \frac{S^*}{S^0}, \quad (2)$$

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 склонности к повреждению; 0 – сильная склонность к повреждению.

При оценке поврежденности углей при различных уровнях насыщения влагой участвовали образцы, отобранные на месторождениях Апсатского

(каменный уголь, группа К) и Донецкого (антрацит, группа А) бассейнов. База прозвучивания составляла 50 мм. Экспериментальные исследования заключались в непрерывном прозвучивании образцов продольными волнами в процессе их циклического замораживания-оттаивания. Оборудование для проводимого эксперимента состояло из лабораторного стенда для ультразвуковых испытаний и многофункциональной программируемой климатической камеры «КТХВ-150» (рисунок 5).

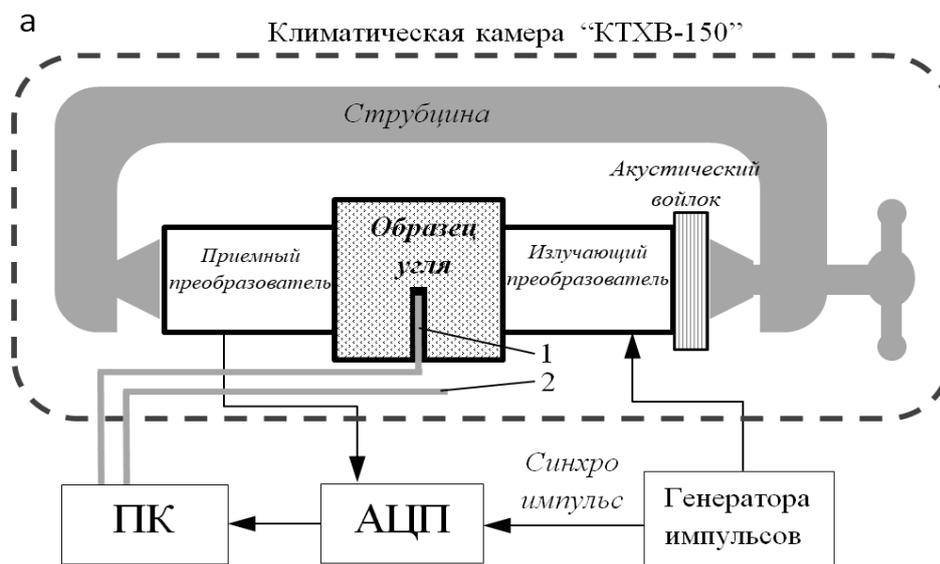


Рисунок 5 — Схема стенда для лабораторных испытаний (1 – термопара, помещенная в центр образца для измерения температуры внутри образца, 2 – термопара для измерения температуры воздуха в климатической камере)

Для обеспечения постоянства контактных условий между пьезопреобразователями и образцом применялась струбцина, что позволило исключить искажение результатов ультразвуковых исследований по причине изменения свойств поверхностного слоя образца.

Ультразвуковые исследования производились при различных уровнях насыщения образцов водой:

- Серия 1 (сухие образцы) испытывалась с естественным содержанием влаги в структуре угля, без дополнительного водонасыщения;

- Серия 2 (водонасыщенные образцы) перед испытанием погружалась в воду на 24 часа.

- Серия 3 (частично водонасыщенные) погружалась в воду на 24 часа, после чего выполнялась сушка образцов в вакуумной камере до снижения уровня влаги до 50% от максимально достигнутого.

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

$$E = \int_0^{T_s} A^2(t) dt, \quad (3)$$

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

$$\tau_k = \frac{1}{B(0)} \int_0^{\infty} |B(\tau)| d\tau \quad (4)$$

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

Известно, что величина автокорреляционной функции  $\tau_k$ , обратно пропорциональна эффективной ширине спектра сигнала  $\Delta f$ , следовательно увеличение автокорреляционной функции  $\tau_k$ , свидетельствует о сужении спектра сигнала, снижение же  $\tau_k$  характерно для увеличения эффективной ширины спектра сигнала:

$$\tau_k = \frac{1}{4\Delta f} \quad (5)$$

**Третья глава** посвящена изучению циклического замораживания оттаивания на свойства углей разного вида с методом активного ультразвукового прозвучивания с использованием поперечных колебаний, а также рассмотрены вопросы оценки степени нарушенности образцов углей под воздействием ЦЗО с использованием спектрального анализа результатов ультразвукового прозвучивания.

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

Согласно полученным данным в ходе проведения предварительных исследований методом акустополарископии на образцах, подвергнутых ЦЗО в лабораторных условиях, наиболее значительные изменения акустических информативных параметров наблюдаются при использовании амплитуды поперечных волн, что проиллюстрировано на рисунке 6.

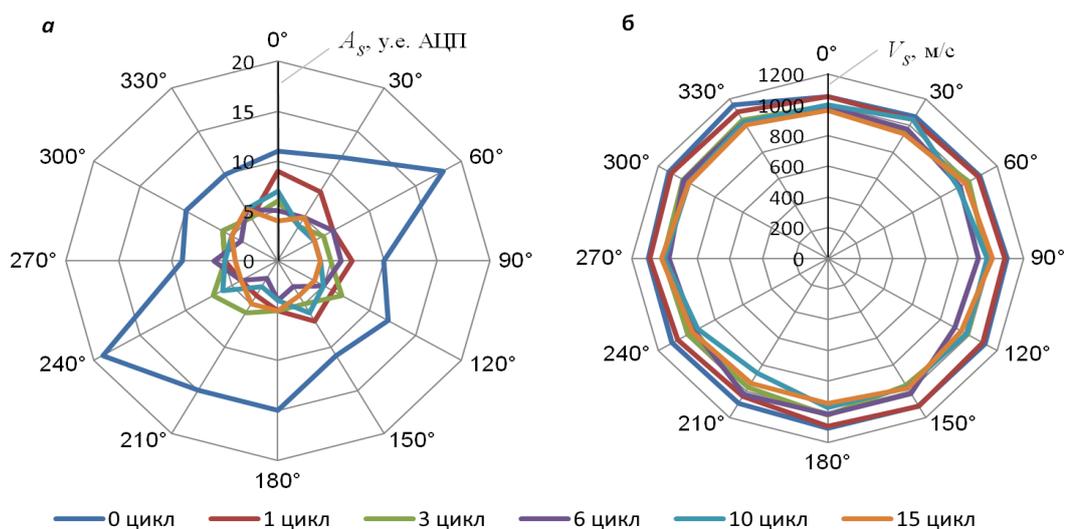


Рисунок 6 — Полярные диаграммы амплитуды (а) и скорости (б) поперечной волны для образца антрацита А1

Аналогичные изменения 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.

Из вышеприведенного рисунка 6 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  $S$ , вычисленной по формуле (1), можно косвенно судить об общем уровне нарушений в образце и динамике его изменения в процессе замораживания-оттаивания.

На рисунке 7 приведены графики расчетных значений  $S$  в функции от числа циклов ЦЗО для различных видов исследованных углей.

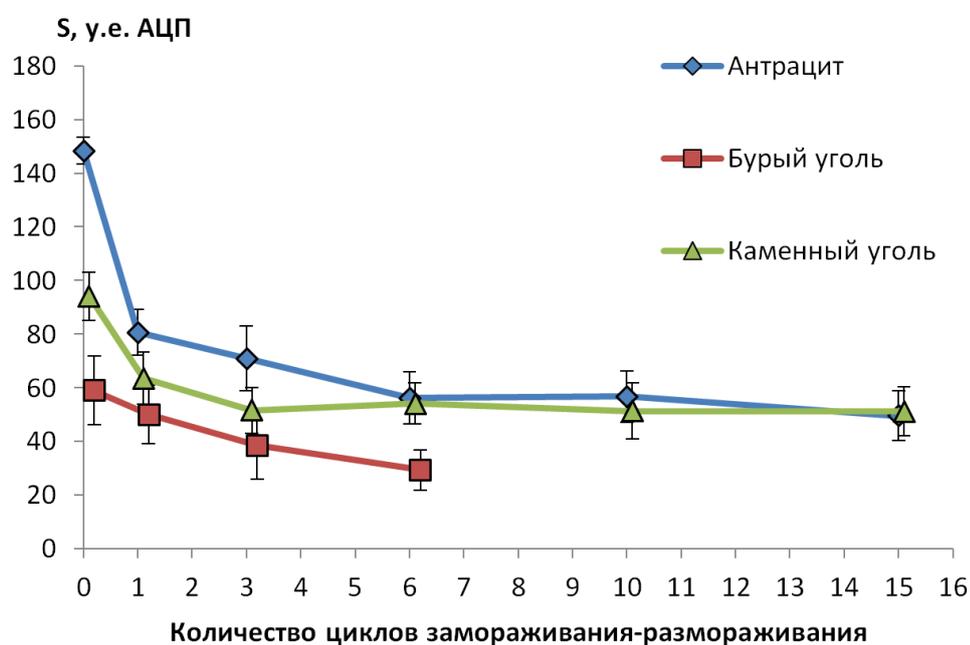


Рисунок 7 — Влияние ЦЗО на площадь полярных диаграмм для различных видов углей (планками показано среднее квадратическое отклонение)

На рисунке 7 показано, что наибольшее количество трещин возникает после первого цикла ЦЗО. Это видно по резкому снижению параметра  $S$ . Причем наиболее значительное изменение наблюдалось при исследовании образцов антрацита, обладающего наибольшей прочностью и плотностью. Наименьший прирост дефектов наблюдался на образцах бурого угля, изначальная нарушенность которого была самой сильной.

Результаты расчета усредненных значений  $k_{c,d}$  по формуле (2) для следующих видов углей: антрацита, бурого и каменного составляют 0.434, 0.684 и 0.674 соответственно. Это означает, что наиболее плотные и прочные угли с

прочными внутренними связями наиболее чувствительны к ЦЗО в условиях неизменного уровня влажности.

Из результатов экспериментов также видно, что во всех образцах наблюдается исходная анизотропия акустических свойств, изменяющаяся по мере роста количества циклов замораживания-оттаивания. На рисунке 8 представлено изменение коэффициента анизотропии  $K_a$ , рассчитанного как отношение максимального значения  $A_s$  к минимальному.

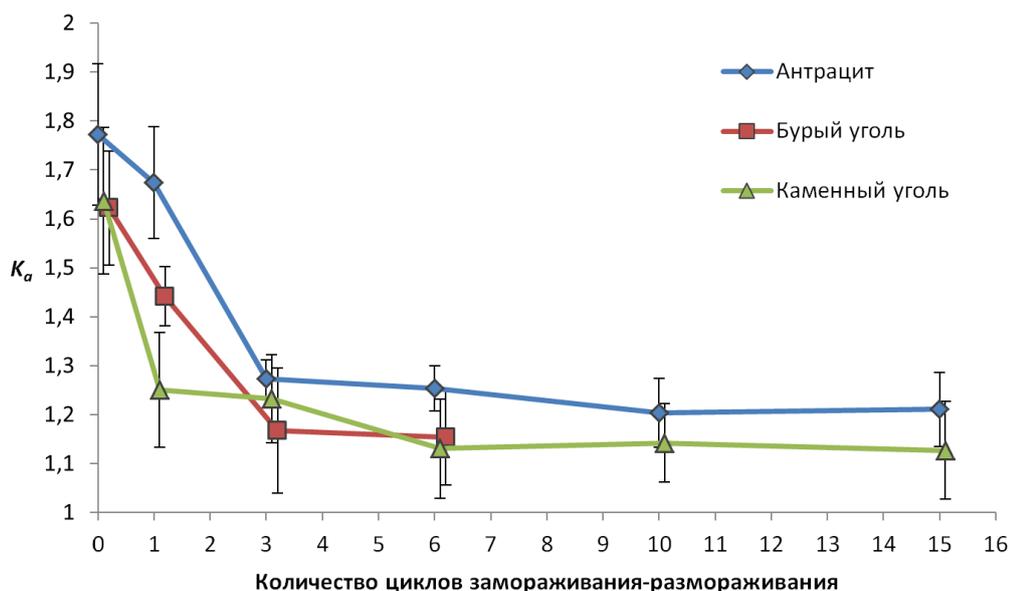


Рисунок 8 — Изменение коэффициента анизотропии  $K_a$  с увеличением числа циклов замораживания-оттаивания (планками показано среднеквадратическое отклонение)

Как видно из рисунка 8, в нулевом цикле (до ЦЗО) наибольший коэффициент анизотропии наблюдался в образцах антрацита, наименьший – в образцах бурого и каменного углей. 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. Высокая чувствительность сдвиговых волн к трещинам свидетельствует о том, что наибольший прирост трещин при ЦЗО происходит в направлении, ортогональном оси естественной анизотропии.

Дополнительную информацию о степени и характере нарушений в образце, особенно о ее динамике, можно получить при использовании спектрального анализа принятых сигналов.

В настоящей работе записанные сигналы подвергались спектральной обработке. Наибольший интерес в данном случае представляют сигналы, полученные вдоль направления максимальных значений амплитуды  $S$ -волны.

На рисунке 9 представлены примеры спектрограмм поперечных волн для антрацита. ЦЗО приводит к постепенному увеличению амплитуд низкочастотной области спектра и одновременному снижению амплитуд высокочастотной области. Наиболее значительное изменение спектрального состава принятых сигналов проявляется после первого цикла. В этом случае частота максимума спектра  $f_{max}$  резко падает с 600 кГц до 100 кГц. Далее  $f_{max}$  претерпевает незначительные изменения.

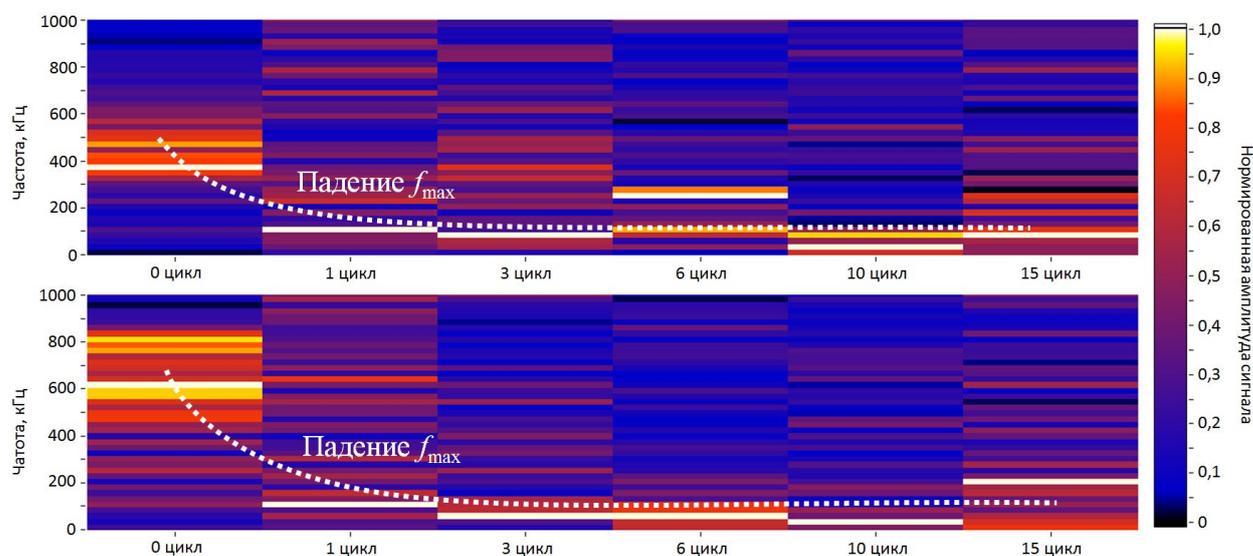


Рисунок 9 — Спектрограммы сигналов, полученные вдоль главной оси анизотропии в образцах антрацита (а)

Спектральному анализу также подвергались результаты ультразвуковых исследований образцов каменного и бурного угля, но значительных изменений спектрального состава на менее прочных углях (каменном и буром) не наблюдается. Это обусловлено тем, что наибольшие термические напряжения возникают вдоль наиболее прочных 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.

При исследовании трещиноватых углей также выполнялась оценка относительного изменения ширины спектра сигнала с использованием интервала корреляции. По результатам вычисления интервала корреляции установлено, что наибольшее изменение  $f_{max}$  происходит после первого цикла замораживания-оттаивания.

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

Исследование влияния влаги на дефектообразование в углях, подвергаемых ЦЗО, производилось по результатам анализа непрерывного прозвучивания образцов продольными волнами. При этом в качестве основного источника информации были использованы спектральные параметры сигналов. Пример спектрограммы для сухого образца группы К приведен на рисунке 10.

Из рисунка 10 видно, что для сухих образцов не характерно существенное изменение спектральных компонент при переходе через границу  $0^{\circ}\text{C}$ . Наблюдается лишь некоторое (в пределах 10 кГц) изменение положения частоты максимума спектра.

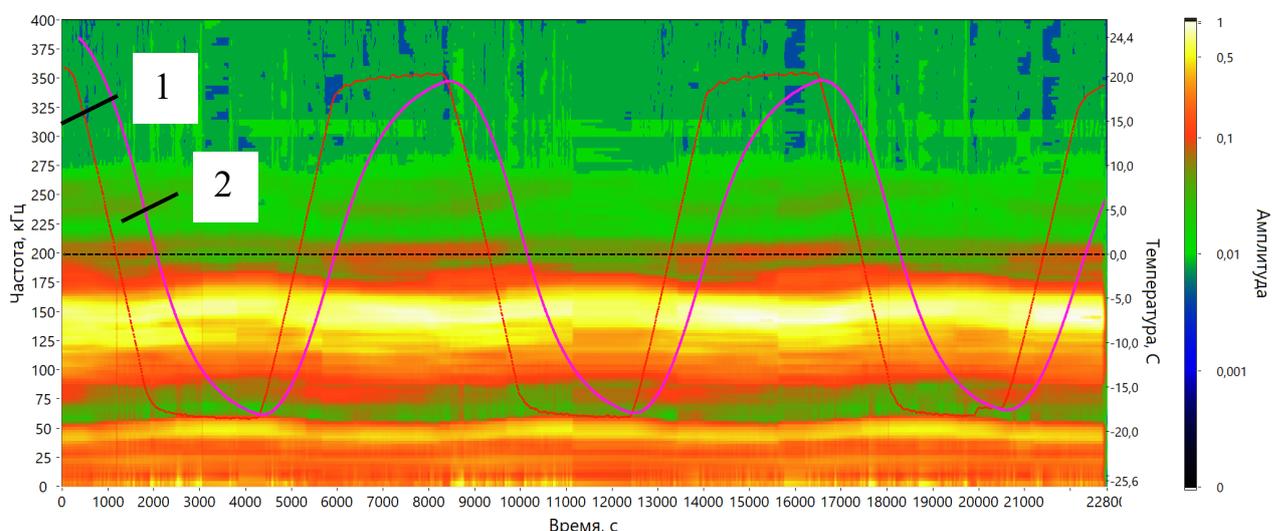


Рисунок 10 — Пример спектрограммы, полученной для образца каменного угля К1 (1 – температура воздуха в климатической камере; 2 – температура в центре испытываемого образца)

Более заметные изменения спектрального состава сигналов начинают наблюдаться при росте уровня насыщения образцов водой. Так на рисунке 11 представлена спектрограмма зарегистрированных УЗ импульсов для образца каменного угля с максимальным уровнем насыщения влагой (2% по массе).

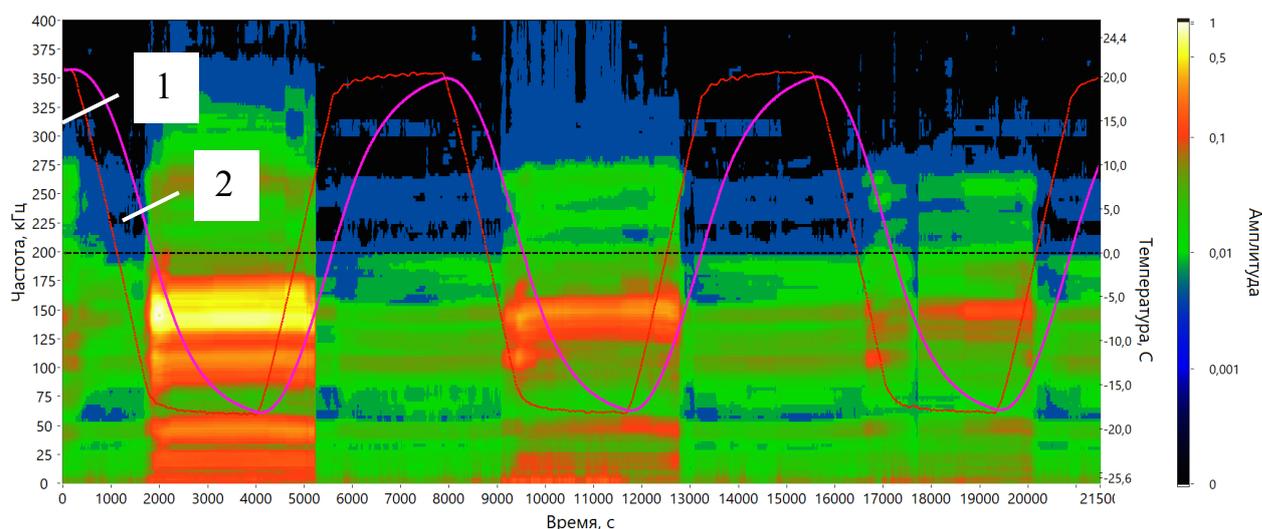


Рисунок 11 — Пример спектрограммы, полученной для образца каменного угля КЗ (1 – температура воздуха в климатической камере; 2 – температура в центре испытываемого образца)

Из рисунка 11 видно, что циклическое замораживание-оттаивание приводит к изменению спектрального состава – обратимого, связанного с переходом воды в твердое агрегатное состояние и обратно, и необратимого (снижение амплитуд  $P$ -волн в районе 150 кГц), связанного с дефектообразованием.

На рисунке 12 показаны вычисленные в соответствии с (3) значения полной энергии сигналов  $E$ . Для удобства сравнения результаты вычислений нормированы по максимальным значениям энергий сигналов для испытанных образцов угля. Значения энергий для однотипных образцов в одинаковых условиях усреднялись. Границы перехода температуры через  $0^{\circ}\text{C}$  даны по данным термодатчика, находящейся внутри образца. Также выполнена оценка с использованием нормированных интервалов корреляции сигналов по формуле (4). На рисунке 13 представлены результаты расчета параметра автокорреляции  $\tau_k$  для всех испытанных образцов угля.

По результатам выполненных исследований установлено существенное влияние на устойчивость к циклическому замораживанию-оттаиванию видов углей, а также степени водонасыщения.

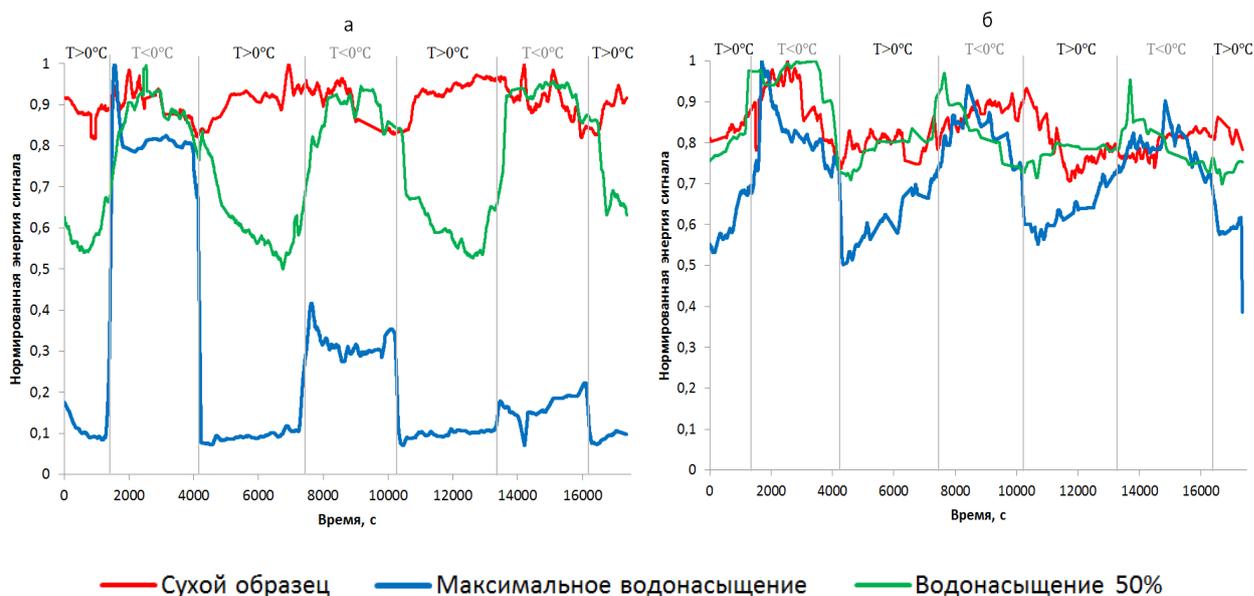


Рисунок 12 — Значения нормированных энергий сигналов для образцов группы К(а) и А(б)

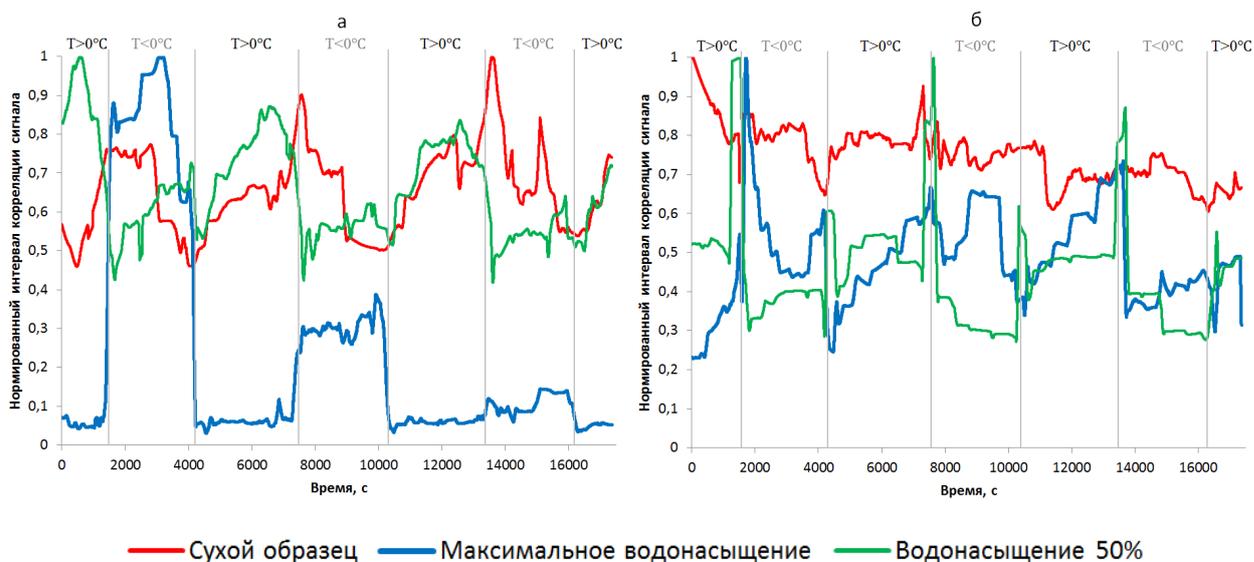


Рисунок 13 — Значения нормированных интервалов корреляции сигналов для образцов группы К (а) и А (б)

В результате экспериментальных исследований установлено следующее:

- Обратимостью циклических изменений спектра сигнала характеризуются сухие образцы каменного угля и антрацита, что свидетельствует об отсутствии образования значительных дефектов.

- Потеря части высокочастотных составляющих в спектрах сигналов наблюдается в образцах каменного угля и антрацита, величина водонасыщения которых составила 1%. Такие изменения спектра свидетельствуют о процессе образования малых по размеру дефектов.

- Значительные, необратимые изменения спектров сигналов зафиксированы при исследованиях образцов угля с содержанием влаги 2%. Причиной изменения спектральных характеристик сигнала являются образующиеся вдоль плоскостей напластования трещины.

При этом однородность угля является фактором, обеспечивающим устойчивость к образованию трещин вдоль напластования под действием ЦЗО, что установлено по результатам сопоставления данных, полученных на антраците и каменном угле.

Проведенные ультразвуковые исследования также показали возможность прогнозирования поврежденности угольной продукции в процессе ее транспортировки, а также выполнения экспресс-анализа уровня содержания влаги в угле под воздействием циклических перепадов температур от положительных до отрицательных значений.

*В четвертой главе* рассмотрены вопросы методического обеспечения способов оценки поврежденности углей под влиянием ЦЗО при транспортировке и хранении угля на структуру, свойства и состояние углей.

По результатам проведенных в рамках диссертационной работы исследований установлено, что на показатели качества продукции могут повлиять параметры поврежденности угля под воздействием ЦЗО в процессе хранения и транспортировки.

На этапе добычи, транспортировки и хранения угля предлагается к применению методика, позволяющая корректировать срок хранения и порядок реализации угольной продукции по степени ее первоначальной поврежденности (коэффициенту устойчивости к ЦЗО).

При проведении первичного контроля угля после добычи, а также повторного контроля в случае резкого изменения определяемых характеристик угля предлагается выполнить ряд испытаний, позволяющих обеспечить сохранение показателей качества угольной продукции при хранении и транспортировке в соответствии с первоначально заявленными характеристиками.

*Способ оценки влияния ЦЗО при транспортировке и хранении угля на структуру, свойства и состояние ископаемых углей по результатам ультразвуковых измерений.*

Назначение способа заключается в выполнении оценки склонности углей к развитию поврежденности под воздействием ЦЗО в процессе транспортировки и хранения с целью сохранения потребительских свойств углей.

Для выполнения оценки влияния ЦЗО необходимо следующее аппаратное обеспечение:

1. Широкополосные акустические преобразователи поперечных волн с центральной частотой 600 кГц;
2. Устройство ориентирования образца, позволяющее вращать образец вокруг вертикальной оси на 360 градусов с шагом 1 градус;
3. Устройство контроля усилия прижатия преобразователей к образцу;
4. Генератор импульса амплитудой до 300 В;
5. АЦП с частотой дискретизации не менее 5 МГц;
6. Персональный компьютер (ПК);
7. Программируемая климатическая камера.

Для оценки влияния ЦЗО при транспортировке и хранении угля на структуру, свойства и состояние ископаемых углей анализируется полярная диаграмма амплитуд поляризованной сдвиговой волны до и после ЦЗО.

Выполнение измерений производится согласно схеме рисунка 14.

Результатом измерений является вычисленный коэффициент устойчивости к ЦЗО. Коэффициент изменяется в диапазоне от 0 до 1, при этом 1 – абсолютное отсутствие склонности к повреждению вследствие воздействия ЦЗО, 0 – сильная склонность к повреждению.

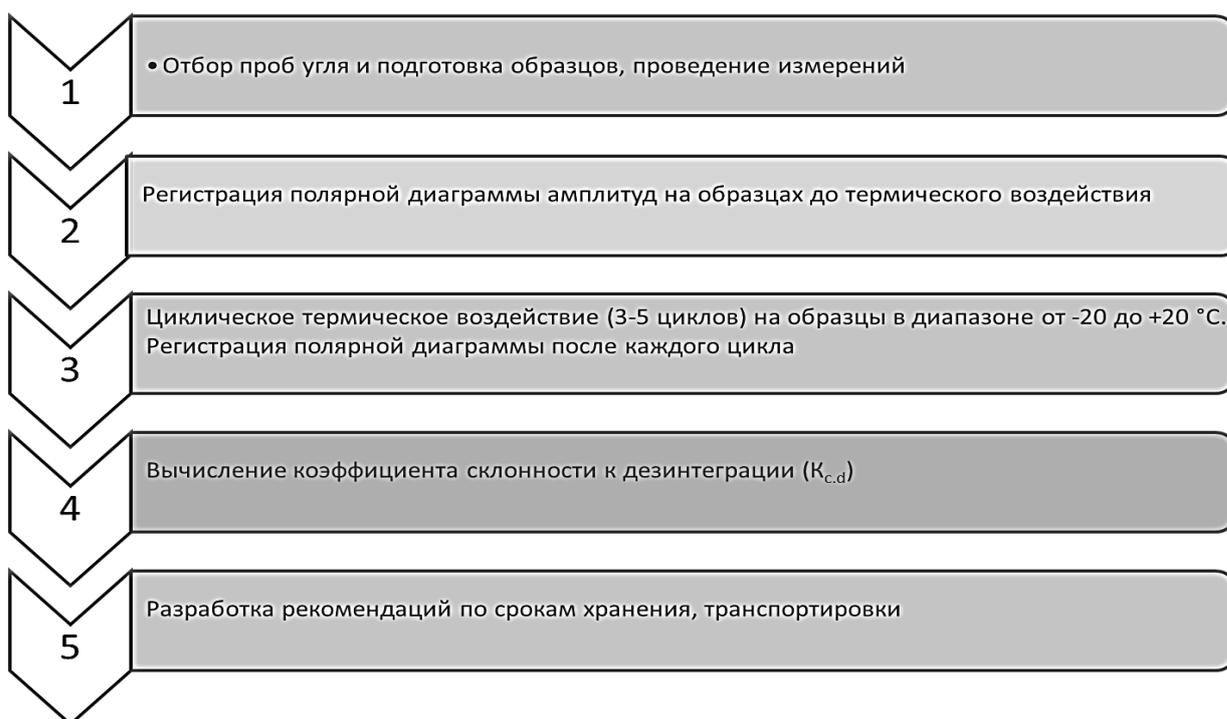


Рисунок 14 — Последовательность выполнения измерений

*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.

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.

Выполнения исследований производится согласно схеме на рисунке 15.

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

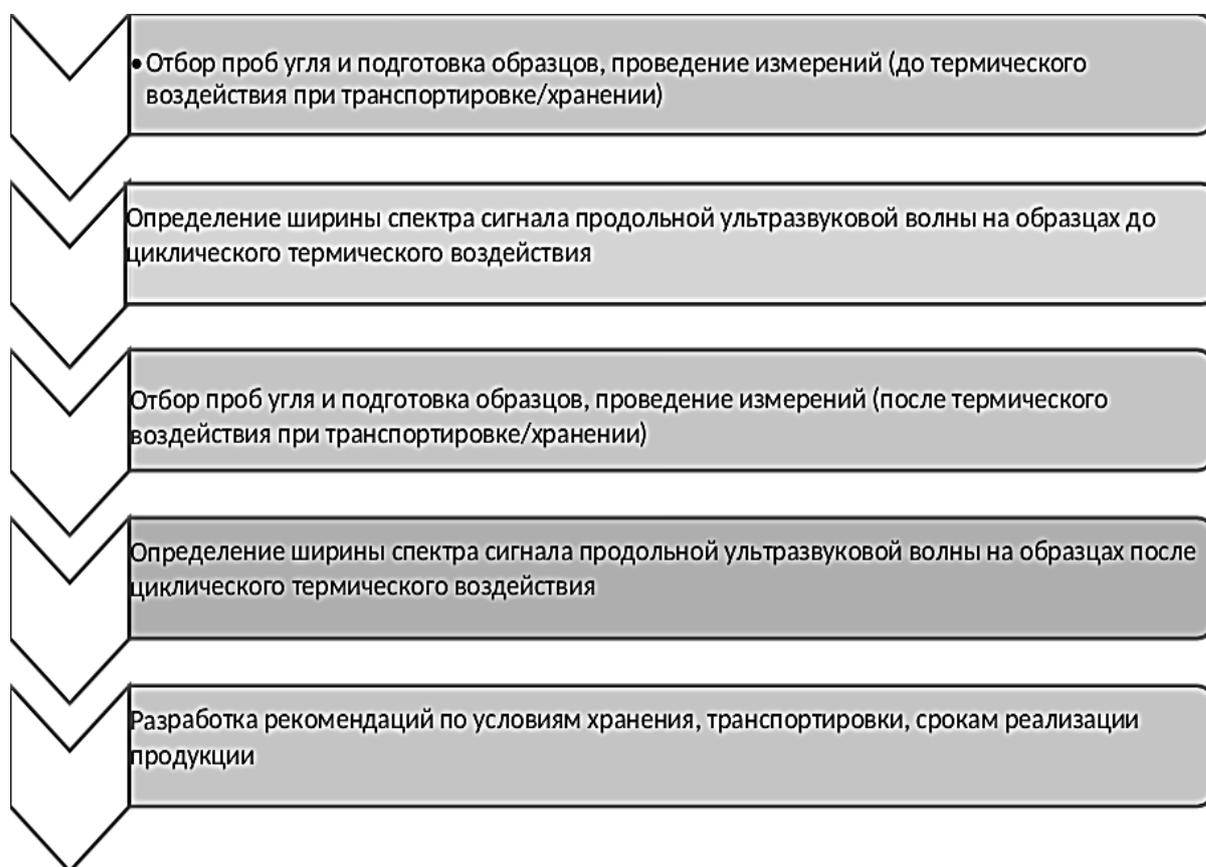


Рисунок 15 — Последовательность выполнения измерений

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.

В рамках работы подготовлена «Методика оценки склонности углей к дезинтеграции после воздействия циклического замораживания-оттаивания», переданная 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».

## 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 образцов всех видов угля с низким содержанием влаги характерны обратимые циклические изменения спектров ультразвуковых сигналов, что свидетельствует об отсутствии процесса образования значительных дефектов. Увеличение содержания влаги в угле ведет к образованию малых по размеру дефектов, что отражает потеря высокочастотных составляющих спектра ультразвукового 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 аппаратурное 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 углепородном массиве».

### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

#### *Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ*

1. Шкуратник, В.Л. Об особенностях ультразвуковых измерений в образцах угля с использованием поперечных упругих волн / В. Л. Шкуратник, П.В. Николенко, П.С. Ануфренкова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 4. – С. 117-126. – DOI 10.25018/0236-1493-2020-4-0-117-126.

2. Шкуратник, В.Л. Качество проявления акустикоэмиссионного эффекта Кайзера в антраците как показатель его стойкости к криотермическим воздействиям / В.Л. Шкуратник, П.В. Николенко, П.С. Ануфренкова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 7. – С. 5-12. – DOI 10.25018/0236-1493-2020-7-0-5-12.

#### *Статьи в изданиях из базы данных Scopus*

1. Experimental study of coal fracture dynamics under the influence of cyclic freezing–thawing using shear elastic waves / P.V. Nikolenko, S.A. Epshtein, V.L. Shkuratnik, P.S. Anufrenkova // International Journal of Coal Science and Technology. – 2020. – DOI 10.1007/s40789-020-00352-x.

2. Failure mechanism of coal under freeze–thaw conditions from the spectrum analysis of ultrasonic scanning data / V. L. Shkuratnik, P. V. Nikolenko, P. S. Anufrenkova, S. A. Epshtein // Journal of Mining Science. – 2021. – Vol. 57. – No 1. – P. 1-9. – DOI 10.1134/S1062739121010014. – EDN WDGUFA.

#### *Результаты изобретательской деятельности*

1. Патент № 2716854 С1 Российская Федерация, МПК G01N 29/22. Применение наждачной бумаги в качестве протектора ультразвукового преобразователя: № 2019130372: заявл. 26.09.2019 опубл. 17.03.2020 / П.С. Ануфренкова, П.В. Николенко, В.Л. Шкуратник; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС".