

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет
«МИСИС»

На правах рукописи

Блохин Дмитрий Иванович

РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО–ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ И
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ ТЕРМОРАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ
ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА

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

Диссертация
на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант
доктор технических наук, профессор
Черепецкая Елена Борисовна

Москва – 2026

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	8
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПАССИВНЫХ (ЭМИССИОННЫХ) ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО–ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД И СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	15
1.1 Современные представления о подходах к мониторингу, оценке и прогнозу изменений состояния породных массивов и элементов строительных конструкций подземных сооружений.....	15
1.2 Эмиссионные эффекты, сопровождающие процессы механического деформирования геоматериалов, и разработанные на их основе геофизические методы контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород	19
1.2.1 Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении геоматериалов	19
1.2.2 Электромагнитная эмиссия при деформировании и разрушении геоматериалов	26
1.2.2.1 Исследования электромагнитного излучения в радио– и оптическом диапазонах.....	27
1.2.2.2 Исследования электромагнитного излучения в инфракрасном диапазоне.....	30
Выводы по Главе 1 и постановка задач исследований	42
ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И АППАРАТУРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕСКОНТАКТНОЙ ТЕРМОРАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ГЕОМАТЕРИАЛОВ	44

2.1 Моделирование влияния микротрещин на изменения температуры геоматериалов при их деформировании.....	44
2.1.1 Выбор и обоснование расчетной механической модели среды, постановка задачи моделирования	44
2.1.2 Оценка приращения температур изотропной среды с хаотически ориентированными и равномерно распределенными по ее объему трещинами при изменении напряженно-деформированного состояния	51
2.1.3 Оценка приращения температур изотропной среды с хаотически ориентированными и случайно распределенными по ее объему трещинами при изменении напряженно-деформированного состояния	54
2.2 Аппаратурное обеспечение для регистрации изменений интенсивности ИК-излучения с поверхности горных пород при их деформировании.....	58
Выводы по Главе 2.....	64
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИК–ИЗЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ГЕОМАТЕРИАЛОВ ПРИ МОНОТОННОМ ИЗМЕНЕНИИ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ.....	66
3.1 Методика и стенды для проведения экспериментальных исследований	66
3.2. Исследования особенностей проявлений термоэмиссионных эффектов в «пластичных» геоматериалах при их одноосном сжатии (на примере образцов каменной соли).....	71
3.2.1. Результаты экспериментов по одноосному испытанию образцов каменной соли в режиме с постоянной скоростью нагружения	72
3.2.2. Результаты экспериментов по одноосному испытанию образцов каменной соли в режиме с постоянной скоростью продольной деформации .	77
3.3 Исследования особенностей проявлений термоэмиссионных эффектов в «хрупких» геоматериалах при их одноосном сжатии (на примере образцов известняка).....	80

3.3.1 Результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств образцов известняка методами электронной микроскопии и лазерно-ультразвуковой структуроскопии.....	80
3.3.2. Результаты экспериментов по одноосному испытанию образцов известняка.....	88
3.3.3. Экспериментальная оценка влияния степени водонасыщения образцов известняка при одноосном деформировании на параметры ИК–излучения ...	90
Выводы по главе 3	97
ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИК–ИЗЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ГЕОМАТЕРИАЛОВ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ ИЗМЕНЕНИИ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ.....	99
4.1. Измерения и анализ вариаций интенсивности ИК – излучения образцов горных пород при низкоамплитудных квазипериодических нестационарных режимах нагружения	99
4.2 Измерения и анализ вариаций интенсивности ИК–излучения образцов горных пород при высокоамплитудных циклических режимах нагружения ...	106
4.2.1. Результаты ИК–диагностики образцов горных пород при периодических режимах нагружения в условиях одноосного сжатия с увеличивающейся от цикла к циклу величиной максимальной нагрузки.....	106
4.2.2. Результаты ИК–диагностики образцов горных пород при близких к предельным режимам периодического нагружения в условиях одноосного сжатия	113
4.3 Экспериментальная оценка степени нарушенности образцов горных пород при высокоамплитудных циклических режимах нагружения в условиях одноосного сжатия по данным терморadiометрических измерений.....	127
Выводы по Главе 4.....	128

ГЛАВА 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФРАКРАСНОЙ РАДИОМЕТРИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВОВ ГРУНТОВ И ГОРНЫХ ПОРОД	130
5.1. Экспериментальные исследования методом ИК–радиометрии изменений напряжений на поверхности забоя скважины в модели грунтового массива ...	130
5.2. Фиксация изменений «быстропротекающих» изменений напряженного состояния «крупномасштабного» образца, моделирующего массив горной породы.....	136
5.3 Методика оценки геомеханического состояния локальных участков породного массива на основе мониторинга его теплового поля	138
Выводы по Главе 5.....	143
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	144
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	147
Приложение А Программа для расчета значений интенсивности полного излучения, интенсивности излучения $w\lambda_1 \rightarrow \lambda_2$ в диапазоне длин волн от λ_1 до λ_2	175
Приложение Б Принципиальная электрическая схема ИК–радиометра.....	176
Приложение В Методика расчета скоростей квазипродольных упругих волн в кальците.....	177
Приложение Г Методика оценки геомеханического состояния локальных участков породного массива на основе мониторинга его теплового поля	178
Приложение Д Информация о внедрении результатов работы на предприятиях	194

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЭ – акустическая эмиссия;

ИК–излучение – инфракрасное излучение;

НДС – напряженно–деформированного состояние;

ЭМИ – электромагнитная эмиссия.

Акустические измерения

V_l , м/с – скорость продольной волны;

V_t , м/с – скорость поперечной волны;

N , имп. – суммарный счет импульсов акустической эмиссии;

$\dot{N}$, имп./с – скорость счета акустической эмиссии;

FR , ед. – Felicity Ratio («соотношение фелисити») – показатель сохранности акустико-эмиссионной памяти.

Физико–механические параметры

$\sigma_{11,22,33}$, Па – главные напряжения;

$\Delta P = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$, Па – первый инвариант тензора напряжений;

σ_{max}^i , Па – максимальный уровень механических напряжений, достигнутый в i –м цикле нагружения образца геоматериала;

ε , мм – продольная деформация образца геоматериала;

$\{C_{ij}\}$, где $i, j = 1, \dots, 6$, ГПа – коэффициенты матрицы жесткости;

$d\sigma/dt$, МПа/с – скорость нагружения образца геоматериала;

$d\varepsilon/dt$, мм/с – скорость изменения продольной деформации образца геоматериала;

E , МПа – модуль Юнга (модуль упругости) образца геоматериала;

σ_e , МПа – предел упругости образца геоматериала;

σ_c , МПа – предел прочности на одноосное сжатие;

ρ , кг/м³ – плотность;

C_p , Дж/(кг·К) – удельная теплоемкость при постоянном давлении;

P , % – пористость.

ИК-радиометрические измерения

$AIRT, K$ – средняя температура инфракрасного излучения;

$IRTR, K/c$ – скорость изменения температуры инфракрасного излучения;

$MIRT, K$ – максимальная температура инфракрасного излучения;

$VDIIT, K^2$ – дисперсия дифференциальной температуры инфракрасного изображения;

$W, Вт$ – мощность инфракрасного излучения;

$\lambda, м$ – длина волны;

$r_{\lambda,T}, Вт/м^3$ – спектральная плотность энергетической светимости;

$w_{\lambda_1 \rightarrow \lambda_2}, Вт/м^2$ – интенсивность излучения в диапазоне длин волн от λ_1 до λ_2 ;

$V_w, у. ед.$ – измеренное значение интенсивности инфракрасного излучения.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования

Неотъемлемой частью строительства и эксплуатации подземных сооружений различного назначения являются исследования по установлению закономерностей изменений во времени параметров, характеризующих напряженно-деформированное состояние (НДС) вмещающих массивов горных пород. При этом объективная потребность в постоянном повышении эффективности таких исследований обусловила широкое внедрение в практику геомеханического мониторинга методов горной геофизики, основанных на измерениях параметров излучений различной физической природы (электромагнитные, акустические и т.д.), сопровождающих процессы деформирования и разрушения горных пород. К одним из активно развиваемых методов геоконтроля относится метод терморadiометрической бесконтактной диагностики (инфракрасной (ИК) радиометрии), интерпретация результатов которого основана на использовании известных термомеханических эффектов: изменение температуры твердого тела при ее адиабатическом деформировании («термоупругий» и «термопластический» эффекты), а также зависимости интенсивности инфракрасного излучения с поверхности тела от температуры. В связи с этим представляется актуальным изучение проявлений указанных термомеханических эффектов в горных породах и создание на этой основе новых современных подходов к контролю геомеханического состояния породного массива, а также соответствующего методического и аппаратного обеспечения.

Настоящая работа выполнялась в рамках ряда научных проектов, среди которых гранты Российского фонда фундаментальных исследований № 07 - 05-12057-офи «Вариации интенсивности инфракрасного излучения геоматериалов как информационная основа средств бесконтактного мониторинга механических процессов в геологических структурах» и № 10- 05-00687-а «Комплексное использование термомеханических и акустикоэмиссионных эффектов для исследования процессов деформирования и разрушения геоматериалов», а также

Государственных контрактов № 16.515.12.5003 от 22.09.2012 г. по теме "Исследование и разработка геотомографических методов контроля и прогноза устойчивости системы "газоносный угольный пласт - горная машина" для снижения рисков техногенных аварий при добыче угля" и № 16.525.12.5008 от 13 октября 2011 г. по теме «Создание технологии прогноза, оценки риска опасных природных и техногенных явлений при подземной разработке твердых полезных ископаемых и выработки технологических решений по их предотвращению на базе интеллектуальной системы поддержки принятия решений и комплексного синтезирующего мониторинга» в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2013 годы".

Цель работы состоит в установлении влияния физико–механических свойств и условий деформирования геоматериалов на параметры сигналов сопутствующего теплового (ИК–) излучения и разработке на этой основе метода диагностики геомеханического состояния породных массивов.

Основная идея работы заключается в использовании для оценки геомеханического состояния породного массива ИК–излучения, возникающего при проявлении сопутствующих процессам деформирования термомеханических эффектов.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Теоретическими расчетами получено, что в изотропной среде с хаотически ориентированными трещинами приращения температур при изменении ее напряженно–деформированного состояния в диапазоне до 20% от разрушающих нагрузок имеют порядок 10^{-2} К.

2. Установлено, что достоверные оценки изменений интенсивности ИК–излучения с поверхности геоматериалов, определяемые по значениям приращений их температуры (с точностью до 10^{-3} К) при деформировании в адиабатических условиях, могут быть получены по данным бесконтактной терморadiометрии в

диапазоне длин волн от 2 до 14 мкм, что создает предпосылки для использования терморadiометрии в качестве инструмента геоконтроля.

3. Установлено, что для повышения надежности оценки изменений напряженно–деформированного состояния геоматериалов необходимо комплексировать результаты ИК– и акустоэмиссионных измерений, что обусловлено диаметрально противоположным характером реакции последних на скорость приложения нагрузки.

4. Доказано, что основой терморadiометрической диагностики структурных особенностей и напряженно–деформированного состояния горных пород являются изменения характера временных зависимостей интенсивности теплового излучения с их поверхности, обусловленные переходами между упругой и пластической стадиями деформирования материала.

5. Доказано, что введенный коэффициент k , равный отношению изменений интенсивности ИК–излучения с поверхности породы и продольной деформации, фиксируемых при циклических нагрузках, позволяет оценивать степень нарушенности материала с учетом его физико–механических и теплофизических свойств, причем увеличение степени нарушенности характеризуется уменьшением значений данного коэффициента.

Методы исследования включали:

– анализ и обобщение данных, опубликованных в нормативной и научно–технической литературе по вопросам лабораторных и натурных исследований эмиссионных процессов различной физической природы, сопутствующих процессам деформирования геоматериалов;

– лабораторные эксперименты, основанные на стандартных методах определения физико–механических параметров горных пород, методах лазерно – ультразвуковой и электронной структуроскопии, методиках акустоэмиссионных и терморadiометрических измерений.

– обработка данных измерений с использованием методов математической

статистики и анализа временных рядов;

- численное моделирование с использованием современных программных комплексов;
- сравнительный анализ и сопоставление результатов моделирования с данными лабораторных наблюдений.

Научная новизна работы заключается в:

- установлении закономерностей изменений характера временных зависимостей интенсивности теплового излучения с поверхности горных пород, обусловленных переходами между стадиями деформирования материала.
- установлении влияния структурных особенностей, физико–механических и теплофизических свойств горных пород, а также скорости приложения внешней механической нагрузки на характер изменений сопутствующего всем стадиям деформирования ИК–излучения;
- установлении влияния степени влагонасыщения горных пород на параметры термоэмиссионных процессов при их нагружении;
- разработке нового метода геоконтроля, основанного на бесконтактных измерениях изменений интенсивности ИК–излучения с поверхности геоматериалов в диапазоне длин волн от 2 до 14 мкм;
- установлении диаметрально противоположного характера реакции на скорость приложения нагрузки термоэмиссионных и акустоэмиссионных процессов, возникающих при деформировании геоматериалов.

Научное значение работы состоит в обосновании возможности терморadiометрического контроля изменений напряженно–деформированного состояния массива горных пород.

Практическая ценность результатов работы состоит в разработке метода диагностики геомеханического состояния породного массива по данным терморadiометрических измерений.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

- использованием апробированных методик и аппаратуры с высокими метрологическими характеристиками при экспериментальных исследованиях проявлений термомеханических эффектов при деформировании геоматериалов;
- использованием прикладных методов теории случайных процессов и обработки временных рядов данных, апробированных в геофизических исследованиях;
- корректным использованием фундаментальных положений механики деформируемого твердого тела при численном моделировании влияния структурных особенностей геоматериалов на проявления термомеханических эффектов при их деформировании;
- удовлетворительной сходимостью результатов экспериментальных исследований с данными численного моделирования.

Личный вклад автора заключается в:

- постановке задач и разработке программы проведения исследований;
- создании аппаратурно–измерительного комплекса, позволяющего производить синхронные измерения вариаций параметров инфракрасного (ИК–) излучения и изменений механических величин, характеризующих наблюдаемые процессы деформирования;
- проведении экспериментальных исследований особенностей проявлений термомеханических эффектов при различных схемах и режимах нагружения образцов горных пород;
- выполнении численного моделирования и оценочных расчетов по оценке влияния структурных особенностей и физико–механических свойств горных пород на параметры сопутствующего процессам их деформирования инфракрасного (ИК–) излучения;
- разработке методики оценки изменений напряженного состояния массивов горных пород по данным терморadiометрических измерений.

Реализация работы. Разработанная «Методика оценки геомеханического состояния локальных участков породного массива на основе мониторинга его

теплового поля» апробирована и принята к использованию АО "ТРИАДА – ХОЛДИНГ" при осуществлении мониторинга напряженно-деформированного состояния элементов конструкций и грунтовых массивов при строительстве и эксплуатации подземных сооружений в условиях мегаполиса; опробована ООО «УСМ – ИНЖИНИРИНГ» при выполнении работ по геотехническому мониторингу фундаментных конструкций и грунтов оснований строящихся и эксплуатируемых сооружений различного назначения, а ООО «Управляющая компания «Талдинская» рассмотрена возможность практической реализации методики при осуществлении мониторинга напряженно-деформированного состояния угольных пластов и породных массивов в подземных условиях.

Апробация работы.

Основные положения и результаты работы докладывались на XVIII–XXI, XXV и XXVI Международных научных школах им. академика С.А. Христиановича «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках» (г. Алушта, 2008–2011, 2015 и 2016 гг.); на V Международной научной школе молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (г. Москва, 2008 г.); на IX Международной научной конференции «Новые идеи в науках о Земле» (г. Москва, 2009 г.); на Международных научной конференциях «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» (г. Новосибирск, 2009 и 2019 гг.); на научных симпозиумах «Неделя горняка» (г. Москва, 2006 и 2009 гг.); на научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения А.В. Римского–Корсакова (г. Москва, 2010 г.); на 15-й Европейской конференции по механике грунтов и геотехнике (ECSMGE) (г. Афины, 2011 г.); на 53 Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» (г. Витебск, 2011 г.); на Международной научно-технической конференции «Проблемы и пути развития горнометаллургической отрасли» (г. Ташкент, 2014 г.); на IX Международной конференции «Микромеханизмы пластичности, разрушения и сопутствующих явлений»

(г. Тамбов, 2018 г.); на Первой совместной научно-практической конференции ГБУ «ЦЭИИС» и ИПРИМ РАН «Обеспечение качества строительства в г. Москве на основе современных достижений науки и техники» (г. Москва, 2018 г.); на Всероссийской научно-технической конференции с участием иностранных специалистов «Прогноз и предупреждение удароопасности при ведении горных работ» (г. Апатиты, 2022 г.); на V Международной научно–практической конференции «Российский форум изыскателей» (г. Москва, 2023 г.), 2–й Международной научно-практической конференции по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению GEOMOS26 (г. Москва, 2026 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 36 научных работ, в том числе 15 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Объем работы: Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 281 наименование, 5 приложений, изложенных на 196 страницах текста, содержит 76 рисунков, 7 таблиц.

Благодарности.

Автор глубоко признателен своему учителю проф. В.И. Шейнину, чьи советы являлись необходимым звеном выполнения всех этапов работы и благодарит его за неоценимый вклад в проведенные исследования. Автор выражает искреннюю признательность научному консультанту проф. Е.Б. Черепецкой за помощь и поддержку при подготовке диссертации. Автор также благодарит коллег из ИПКОН РАН им. Н.В. Мельникова, НИТУ МИСИС и НИИОСП им. Н.М. Герсевича, в творческом сотрудничестве с которыми проводились исследования: проф. Кубрина С.С., проф. Саваторову В.Л., проф. Талонова А.В., доц. Комиссарова А.А., доц. Новикова Е.А., Дегтерева В.В., Иванова П.Н., Дружинскую Д.С., Сарану Е.П. и Максимовича И.Б.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПАССИВНЫХ (ЭМИССИОННЫХ) ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО–ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД И СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

1.1 Современные представления о подходах к мониторингу, оценке и прогнозу изменений состояния породных массивов и элементов строительных конструкций подземных сооружений

Расширение спектра и увеличение интенсивности техногенных динамических воздействий на геологическую среду (разработка месторождений полезных ископаемых, освоение подземного пространства мегаполисов, высотное строительство и т.д.) в совокупности с нагрузками природного происхождения (сейсмическими, ветровыми, гидрологическими и т.д.) ведет к возникновению и активизации опасных геомеханических процессов, существенно влияющих на устойчивость различных инженерных сооружений [1 – 8].

Примеры таких сооружений – горные выработки (шахтные стволы, очистные и подготовительные забои и др.), плотины и напорные тоннели гидроэлектростанций, основания фундаментов различных инженерных сооружений и подземные хранилища нефти и газа, которые в реальных условиях, как и вмещающие их породные массивы, могут подвергаться низкочастотным ($\approx 0,5 - 20$ Гц) многократно повторяющимся циклам “нагружения – разгрузки”, что приводит к снижению прочности слагающих пород и, как следствие, повреждениям инфраструктуры [8 – 10].

Высокие скорости подвигания очистных и подготовительных забоев в условиях подземной разработки месторождений обуславливают существенное изменение геомеханического состояния вмещающих породных массивов. Следствием таких процессов является интенсификация негативных проявлений горного давления, ведущая к снижению устойчивости горных выработок [2, 11 – 13].

Активное использование подземного пространства городов, обусловленное возросшими потребностями в развитии транспортной инфраструктуры, инженерных систем с учетом нарастающего дефицита городских территорий также приводит к риску возникновения различных аварийных ситуаций, наиболее часто фиксируемых при устройстве котлованов [14 – 16].

При этом для всех перечисленных случаев отмечается характерная тенденция, заключающаяся в том, что при уменьшении вероятности каждого отдельно взятого негативного события масштабы последствий, как правило, заметно возрастают [17, 18].

Изменчивость механического состояния геологической среды всё чаще становится объектом пристального изучения. Задача получения данных о напряжённо–деформированном состоянии литосферных участков и характеристиках происходящих в них физических процессов требует интеграции наук о Земле (геологии, инженерной геологии, геофизики, прикладной геофизики, сейсмологии) и современных вычислительных методов [19].

Важнейшие результаты в области исследования геомеханических процессов в горных выработках и грунтах оснований получены в работах следующих отечественных ученых: Адушкина В.В., Баряха А.А., Баклашова И.В., Болдырева Г.Г., Борисова А.А., Викторова С.Д., Еременко В.А., Захарова В.Н., Зерцалова М.Г., Иофиса М.А., Кочаряна Г.Г., Кузнецова С.В., Кузьмина Ю.О., Курлени М.В., Либермана Ю.М., Одинцева В.Н., Опарина В.Н., Петухова И.М., Протодьяконова М.М., Протосени А.Г., Ржевского В.В., Руппенейта К.В., Татаринова В.Н., Тер – Мартиросяна З.Г., Трофимова В.А., Трубецкого К.Н., Турчанинова И.А., Христиановича С.А., Цытовича Н.А., Шейнина В.И., Шемякина Е.И. и др. [20 – 50].

Анализ исследований указанных авторов позволяет заключить, что проблемы технологического и экологического характера, возникающие в настоящее время при освоении месторождений полезных ископаемых и устройстве подземных сооружений, подчёркивают необходимость дальнейшего развития прикладной геомеханики. Особое значение при этом приобретает изучение

пространственно–временной динамики напряжённо–деформированного состояния (НДС) породных массивов в условиях различных природных и техногенных воздействий. В этой связи целесообразна как разработка новых, так и модернизация существующих методов оценки изменений напряжённо–деформированного состояния массивов горных пород – они необходимы для обоснования и внедрения технологических решений, обеспечивающих надёжность и безопасность подземных объектов.

Несомненно, что для достоверного описания изменений геомеханического состояния породных массивов необходимы натурные инструментальные исследования: они дают возможность отслеживать особенности протекания деформационных процессов и оценивать влияние на них условий ведения горных работ [21, 51, 52]. При этом для корректной оценки таких геомеханических процессов необходимо проведение комплексных инструментальных наблюдений, позволяющих получать данные о компонентах тензоров напряжений и деформаций с высокой степенью надёжности [46, 53].

Согласно принятой классификации, инструментальные методы оценки напряжённого состояния массива горных пород подразделяют по физическим принципам на две основные группы — геомеханические и геофизические [46, 53]. В основе методов геомеханической группы лежат измерения деформаций; на базе этих данных с использованием уравнений теории упругости выполняют расчёт действующих напряжений [10, 22, 46, 54 – 56]. В число геомеханических методов входит метод разгрузки и ряд его модификаций, среди которых – метод разности давлений, метод измерения деформаций в скважинах, метод компенсационной нагрузки [57 – 64], а также способы определения напряжений в породном массиве посредством гидравлических датчиков [65, 66].

Методы второй группы основаны на исследовании зависимости параметров физических полей (естественных или искусственно наведенных) от действующих на этом участке напряжений [67 – 70].

В настоящее время в прикладной геомеханике и геотехнике широкое распространение получили активные методы геоконтроля, такие как акустические

(сейсмоакустические, ультразвуковые, сейсмические), электрометрические, радиоволновые и радиоизотопные [68, 71 – 79]. Тем не менее, пассивные геофизические измерения, использующие широкий спектр эмиссионных эффектов (акустических, электромагнитных и др.), также применяются достаточно эффективно [80 – 84].

Существенный вклад в обоснование использования пассивных (эмиссионных) методов геоконтроля в системах мониторинга состояния элементов конструкций подземных сооружений и массивов горных пород внесли работы ИПКОН РАН, ИФЗ РАН, ГИ УрО РАН, ИГД УрО РАН, ИГД СО РАН, ГИ КНЦ РАН, ИГД ХФИЦ ДВО РАН, ФГБНУ «РАНИМИ», НИИОСП им. Н.М. Герсевича, ГИ НИТУ МИСИС, КузГТУ и других организаций.

Следует отметить значительную роль в разработке и развитии описываемых методов следующих отечественных учёных: Анциферова А.В., Винникова В.А., Вознесенского А.С., Дырдина В.В., Курлени М.В., Лаврова А.В., Набатова В.В., Николенко П.В., Пономарева А.В., Простова С.М., Ржевского В.В., Соболева Г.А., Шкуратника В.Л., Устинова К.Б., Яковицкой Г.Е., Ямщикова В.С. [40, 71, 73, 75, 76, 82, 85 – 93].

Большой вклад также внесён зарубежными исследователями: Brady B.T., Carpinteri A., Hardy Jr. H. R., Holcomb D., Kaiser J., Lockner D., Luong M.P., Ma L., Mogi K., Ogawa T., Ohtsu M., Seto M., Wu L., Yixin Z. и др. [94 – 107].

Работы указанных авторов демонстрируют заметный рост методического и аппаратного уровня пассивных методов геоконтроля, позволяющих фиксировать изменения параметров, характеризующих напряженно-деформированное состояние, а также отслеживать их динамику во времени. Указанные методы, в основе которых лежат эмиссионные явления различной физической природы, отличаются степенью теоретической проработанности, возможностями проведения неразрушающих (бесконтактных) измерений, качеством аппаратуры, устойчивостью к помехам и т.д. Следующий раздел посвящён детальному рассмотрению некоторых эмиссионных эффектов, сопутствующих процессам

деформирования материалов, а также методов геоконтроля, разработанных на их основе.

1.2 Эмиссионные эффекты, сопровождающие процессы механического деформирования геоматериалов, и разработанные на их основе геофизические методы контроля напряженно-деформированного состояния массивов горных пород

1.2.1 Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении геоматериалов

Акустическая эмиссия (АЭ) – это физическое явление, заключающееся в излучении упругих волн при локальной перестройке структуры материала, например, при деформации, трещинообразовании или разрушении. [108 – 110]. В более крупном пространственном масштабе акустическая эмиссия проявляется как микросейсмичность [111, 112].

При анализе и интерпретации данных акустической эмиссии в технической литературе используют различные ее параметры: число импульсов, суммарный счет, активность, скорость счета, энергия, спектральные характеристики акустических импульсов и т.д. [108, 109, 113].

В экспериментальной геомеханике анализ акустоэмиссионных данных используется для изучения стадийности накопления повреждений в нагруженных геоматериалах [90, 109, 114 – 121], изучения особенностей микроразрушения при повышенных и пониженных температурах (термоакустическая эмиссия) [85, 91, 122, 123], триггерных эффектов разрушения при воздействии слабых физических полей [114, 124], лабораторном моделировании процесса гидроразрыва пласта [125, 126] и моделировании деформационных процессов в окрестности горных выработок [127, 128].

Весомый вклад в изучение, становление и промышленное внедрение пассивных сейсмоакустических (акустоэмиссионных) методов прогнозирования

строения, нарушенности, физико–механических свойств и состояния породных массивов внесли В.Н. Захаров, А.В. Анциферов, И.Ю. Рассказов, И.А. Кривошеев, А.В. Шадрин и др. [111, 129 – 132].

Исследование акустической эмиссии при лабораторном деформировании образцов горных пород широко распространено как один из подходов к выяснению закономерностей процесса подготовки опасных геомеханических процессов [90, 133]. Так, в процессе многочисленных лабораторных и натурных исследований российскими и зарубежными учеными физико-механических свойств горных пород установлена взаимосвязь между проявлениями акустической эмиссии и процессами деструкции горных пород, позволяющая выделить несколько стадий деформирования [90, 109, 110, 133].

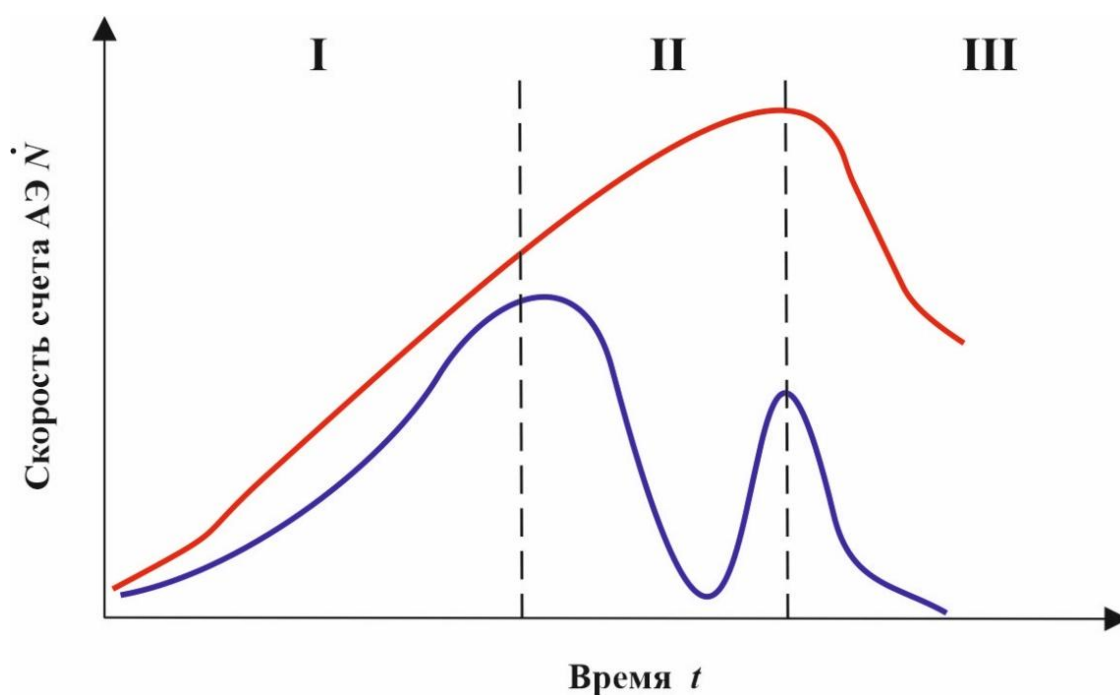


Рисунок 1.1 – Оценка стадий деформирования геоматериалов по данным АЭ – измерений

Результаты лабораторного моделирования, проведенного в ИФЗ РАН (Г.А. Соболев, А.В. Пономарев и др.), демонстрируют наличие трех стадий изменения активности акустической эмиссии (Рисунок 1.1), сопровождающей процессы деформирования и разрушения образцов [90]. Первая стадия (I) – увеличение акустической активности, вторая (II)– акустическое затишье и третья

(III) – вторичная активизация акустических импульсов в момент достижения образцами предела прочности и последующего разрушения. Стадия I протекает на фоне постепенно увеличивающейся нагрузки и соответствует накоплению микротрещин в образце. Стадия II наблюдается на этапе укрупнения микротрещин и начала их локализации. Стадия III формируется на фоне падающей нагрузки и формирования магистральных трещин.

В течении ряда лет в ГИ НИТУ МИСИС (В.Л. Шкуратник, А.С. Вознесенский, П.В. Николенко и др.) проводились экспериментальные исследования закономерностей АЭ образцов горных пород при различных режимах их нагружения [116, 118, 119, 134]. Установлено, что характер проявления акустической эмиссии (АЭ) зависит от режима и стадии деформирования нагружаемого геоматериала. Аномальные изменения параметров АЭ на границах стадий деформирования отражают смену механизмов деструкции материала, что позволяет не только чётко разделять указанные стадии, но и оценивать изменения параметров, характеризующих механические свойства пород. Выявленные стадии и закономерности акустоэмиссионных проявлений, регистрируемых при деформировании и разрушении геоматериалов, были использованы для построения прогностических алгоритмов, которые в ряде случаев были успешно применены для прогноза реальных геомеханических процессов [116].

Особую практическую направленность приобрели исследования изменений параметров АЭ при циклическом нагружении геоматериалов.

Так называемый акустоэмиссионный «эффект памяти» (эффект Кайзера) наблюдается, например, при циклическом одноосном нагружении твердого тела с возрастающей от цикла к циклу амплитудой [87, 97, 98, 135 – 139]. Характерной особенностью эффекта Кайзера является отсутствие воспроизводимости скорости счета $\dot{N}$ (или активности) АЭ до напряжения σ_{max}^I , соответствующего максимуму нагрузки предыдущего цикла. Превышение указанного значения осевого напряжения сопровождается резким, скачкообразным увеличением величин параметров АЭ (Рисунок 1.2).

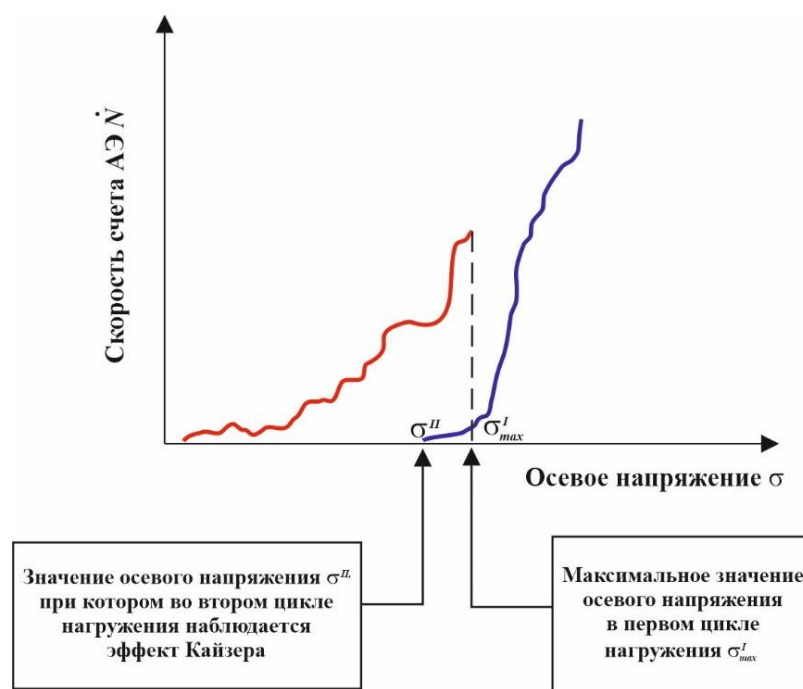


Рисунок 1.2 – Схематическое изображение зависимости скорости счета АЭ от осевого напряжения σ при двухцикловом нагружении образца горной породы в условиях одноосного сжатия

Наблюдаемое «скачкообразное» возрастание $\dot{N}$ обусловлено тем, что существующие в материале неоднородности (микротрещины, дислокации и т.п.) остаются стабильными (отсутствие акустических сигналов) до тех пор, пока текущее напряжение не превысит максимального значения из предшествующих циклов нагружения.

Следовательно, акустическая эмиссия может служить индикатором структурных изменений в материале: анализ параметров АЭ – сигналов при различных режимах нагружения позволяет оценить его целостность. Одним из таких индикаторов является суммарный счет акустической эмиссии N . На Рисунке 1.3 представлена характерная зависимость изменения N от напряжения, фиксируемая при испытаниях образцов геоматериалов на одноосное циклическое воздействие с возрастающей от цикла к циклу амплитудой нагрузки.

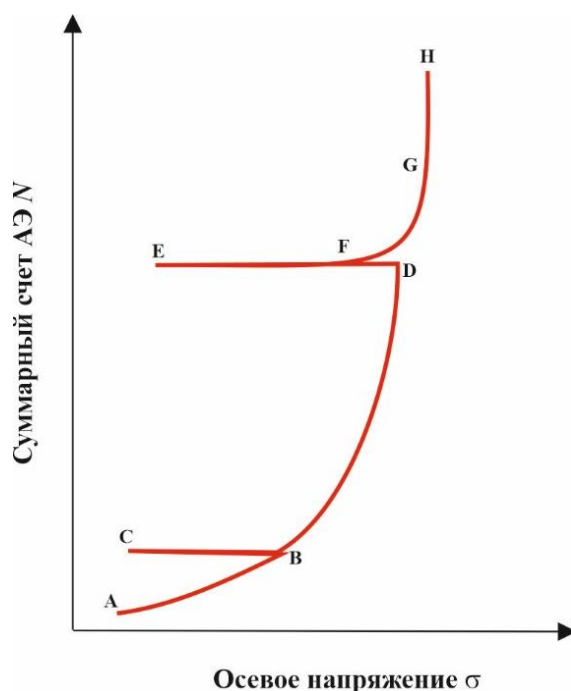


Рисунок 1.3 – Схематическое изображение зависимости суммарного счета АЭ N от осевого напряжения σ при трехцикловом нагружении образца горной породы в условиях одноосного сжатия

На этапе первоначального нагружения (зависимость $N(\sigma)$, участок AB, Рисунок 1.3) фиксируется накопление АЭ-событий. При разгрузке и последующем повторном нагружении (зависимость $N(\sigma)$, участок BCB, Рисунок 1.3) число зафиксированных акустических импульсов практически не меняется вплоть до достижения σ значения максимального напряжения, достигнутого в первом цикле (зависимость $N(\sigma)$, точка B, Рисунок 1.3). Дальнейшее увеличение σ (зависимость $N(\sigma)$, участок BD, Рисунок 1.3) вновь интенсифицирует генерацию АЭ-сигналов («эффект Кайзера»), рост числа которых уменьшается при повторном снятии нагрузки. В точке F (зависимость $N(\sigma)$, Рисунок 1.3) третьего цикла нагрузки наблюдается отклонение от «эффекта Кайзера»: здесь значительные выбросы АЭ возникают до достижения предыдущей максимальной нагрузки (точки D). Это явление известно как эффект Фелисити (Felicity effect) и свидетельствует о накоплении необратимых повреждений в материале [87, 137, 140, 141].

Степень поврежденности геоматериала может быть количественно охарактеризована показателем сохранности памяти FR (Felicity Ratio)

[87, 137, 140, 141]. Показатель FR представляет собой отношение напряжения, при котором отмечается эффект памяти в n – м цикле нагружения к максимальной величине напряжения, испытанной в предыдущем цикле нагрузки (Рисунок 1.2). В случае идеального эффекта памяти $FR = 1$. С приближением значения максимального ранее достигнутого напряжения к величине предела прочности уровень поврежденности увеличивается, а показатель FR снижается.

В работе И.В. Колодиной [142] установлено, что показатель сохранности акустоэмиссионной памяти горных пород FR при их двухцикловом нагружении с возрастающей от цикла к циклу максимальной нагрузкой может быть использован в качестве информативного параметра нарушенности геоматериала под влиянием факторов выветривания.

Результаты практической реализации использования эффекта Кайзера для оценки напряжений в породных массивах изложены, например, в работах В.А. Асанова и Н.Л. Бельтюкова [143, 144], П.В. Николенко [145], М.И. Рассказова [146], A. Lehtonen [147] и др.

Следует отметить, что изменения нарушенности горных пород, вызванные внешними воздействиями (механическими, температурными и т.д.), отражаются не только в описанных акустоэмиссионных проявлениях, но также и в других схожих физических эффектах, фиксируемых в геоматериалах при их циклическом деформировании. Так, зависимости продольных деформаций, параметров электромагнитного излучения, скорости ультразвуковых волн, удельного электрического сопротивления и др. от напряжений, возникающих при циклических воздействиях на геоматериалы, демонстрируют особенности, обусловленные предысторией процессов их деформирования [87, 137].

Начиная с 1980–х годов метод акустической эмиссии достаточно широко применяется для диагностики НДС железобетонных строительных конструкций. Развитие этого направления прежде всего связано с пионерскими работами М. Ohtsu, в которых описываются методы, пришедшие в строительную механику из сейсмологии и основывающиеся на строгом математическом базисе,

описывающем характер распространения упругих волн от заданного источника [104, 148].

Среди отечественных исследований в области акустикоэмиссионной диагностики процессов деформирования бетонов и железобетонных конструкций наиболее интересные результаты получены в работах специалистов ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ВолгГАСУ, АО «НИЦ «Строительство» и др. [149 – 153].

В частности, в этих работах методом акустической эмиссии впервые было выявлено существование четырех стадий деформирования бетона под воздействием механического нагружения:

- уплотнение в границах $(0 - 0,2) \cdot R$;
- появление микротрещин в границах $(0,2 - 0,75) \cdot R$;
- появление макротрещин в границах $(0,75 - 0,96) \cdot R$;
- активное разрушение при значениях $(0,96 - 1) \cdot R$, где R – предел прочности бетона.

Результаты одновременной записи изменения тензометрических характеристик и основных параметров АЭ при испытании на изгиб образцов бетона различного состава приводятся в работе Перфилова В.А. [151]. Установлено влияние скорости нагружения на особенности изменения суммарной АЭ для бетонов с различными типами заполнителей.

Проведенные под руководством А.И. Сагайдака (АО «НИЦ «Строительство») исследования на макетах бетонных и железобетонных строительных конструкций позволили разработать методику оценки напряженно деформированного состояния таких объектов методом АЭ [152, 153]. По результатам исследований установлено, что метод АЭ позволяет оценить уровни напряжений в бетоне конструкций при ее нагружении в пределах $0,35 - 0,95$ от R . Определены границы применения эффекта Кайзера для бетонных и железобетонных конструкций. Установлено, что в армированном бетоне эффект Кайзера сохраняется устойчиво на более высоком уровне нагружения $(0,7...0,9 \cdot R)$ по сравнению с бетонными образцами, где при превышении уровня $0,6...0,7 R$ существует разброс данных.

Несмотря на огромное количество исследований в данной области и достигнутые успехи в области АЭ диагностики, в настоящее время не решенным остается ряд задач, связанных с существенными недостатками методического и аппаратного характера, которые ограничивают точность и применимость акустоэмиссионных методов геоконтроля в практических условиях.

Тем не менее, заключая настоящий краткий обзор возможностей использования метода акустической эмиссии применительно к задачам горной промышленности и строительства, можно утверждать, что АЭ–измерения в настоящее время стали не только эффективным инструментом при решении исследовательских задач в области физики прочности, пластичности и разрушения геоматериалов, но и одним из основных средств мониторинга механических процессов в породных массивах и элементах строительных конструкций.

1.2.2 Электромагнитная эмиссия при деформировании и разрушении геоматериалов

Процессы деформирования и разрушения твердых тел, в т.ч. и горных пород, также сопровождаются электромагнитным излучением в широком диапазоне частот [154 – 158]. Основной механизм возникновения такого излучения в геоматериалах связан с ускоренным перемещением заряженных поверхностей трещин [159, 160]. Подобно АЭ, интенсивность проявлений электромагнитных эмиссионных процессов зависит от минералогического состава и структурных особенностей горных пород, влажности, а также от режимов и параметров их нагружения. К настоящему времени методы, основанные на регистрации электромагнитных сигналов, считаются одними из перспективных как для оценки изменений напряженно–деформированного состояния массивов горных пород, так и для исследований их нарушенности [76, 81, 82, 93, 161, 162].

1.2.2.1 Исследования электромагнитного излучения в радио– и оптическом диапазонах

Результаты ряда теоретических и экспериментальных исследований продемонстрировали возможность использования электромагнитного излучения радиодиапазона (ЭМИ) для идентификации особенностей развития разрушения геоматериалов.

В исследованиях Курлени М.В., Кулакова Г.И., Яковицкой Г.Е. и др. экспериментально доказано, что при одноосном нагружении образцов горных пород с постоянной скоростью проявляется трехстадийность процесса их разрушения [76, 93]. В указанных работах продемонстрировано, что на этапе деформирования, предшествующем нарушению сплошности образцов горных пород, наблюдается смещение верхней границы амплитудных спектров в высокочастотную область – это видно из спектрально–временных характеристик эмиссионных электромагнитных сигналов..

В рамках решения задач неразрушающего контроля строительных материалов (бетонов) в работах Томского политехнического университета разработаны критерии ЭМИ–методов определения прочности, пористости и изменения их напряженно–деформированного состояния [157, 163, 164]. В частности, при квазистатическом нагружении образцов бетонов выявлены наиболее характерные виды сигналов электромагнитной эмиссии, соответствующие различным стадиям деформирования испытываемых материалов.

В ГИ НИТУ МИСИС получены интересные результаты, касающиеся исследований с помощью метода ЭМИ явления, аналогичного акустикоэмиссионному эффекту памяти (эффекту Кайзера) [87, 135, 137]. В этих работах показано, что в ходе «малоциклового» нагружения образцов горных пород активность электромагнитной эмиссии возрастает скачкообразно при напряжениях, соответствующих максимальному уровню нагрузки предыдущего цикла.

Наряду с изучением физических механизмов формирования сигналов электромагнитного излучения (ЭМИ) при деформировании и разрушении геоматериалов, метод получил активное развитие в задачах прогноза и контроля сейсмических событий, а также динамических проявлений горного давления в породных массивах [80, 86, 158, 165].

Несомненный интерес представляют работы, посвященные исследованиям взаимосвязи параметров акустической и электромагнитной эмиссии при механическом воздействии на геоматериалы [80, 86, 90].

Соболевым Г.А. показано [90], что при нагружении горных пород гистограмма выделения суммарной энергии ЭМИ существенно отличалась от аналогичной гистограммы, построенной по одновременно регистрируемым данным АЭ. Отмечается, что на этапе, предшествующем появлению магистральной трещины, активность акустической эмиссии заметно падает (наблюдается «затишье»), в то время как электромагнитная эмиссия демонстрирует рост интенсивности. График изменения во времени отношения суммарных энергий ЭМИ и АЭ показывает четкие максимумы, которые условно могут быть названы предвестниками образования макротрещин [90].

В работе А.С. Вознесенского, В.Л. Шкуратника и др. [86] установлено, что в области допредельного деформирования гипсосодержащих пород коэффициент корреляции синхронно регистрируемых временных зависимостей изменений значений активностей электромагнитной и акустической эмиссий принимает положительные значения, а в запредельной области этот коэффициент имеет отрицательные значения.

Среди электромагнитных явлений, используемых для оценки динамики геомеханического состояния горных породах, следует выделить такие, которые сопровождаются электромагнитными сигналами, характеризующими протекание деформационных процессов, и на регистрируемые значения параметров которых не оказывают влияние электрические помехи, связанные с работой горного оборудования.

Например, в работах [155, 156] показано, что кинетика импульсов электромагнитной эмиссии оптического диапазона является отражением накопления элементарных повреждений в деформируемых образцах горных пород. Наблюдаемое свечение горных пород в оптическом диапазоне электромагнитного излучения представляет собой механолюминесценцию, которая происходит за счет электрических полей, возникающих в нагружаемом массиве за счет пьезоэффекта, электрострикции и других механоэлектрических процессов. При этом основная доля энергии светового излучения приходится на сплошной спектр видимого диапазона, а параметры спектральных оценок регистрируемых сигналов зависят и от состава газа, в атмосфере которого происходит испытание образцов, и от минерального состава образцов. В указанных работах также установлена корреляционная связь между амплитудными параметрами радио– и световых импульсов на различных стадиях деформирования образцов горных пород.

В заключении раздела можно сделать вывод, что методы оценки изменений напряженно–деформированного состояния породных массивов, основанные на регистрации электромагнитного излучения, несомненно являются перспективными с точки зрения повышения эффективности геомеханического обеспечения горных работ. В настоящее время на ряде шахт и рудников апробированы и приняты к использованию методы геоконтроля, основанные на регистрации сигналов электромагнитного излучения в радио– и оптическом диапазонах. Однако в связи с тем, что образующие массив горные породы представляют собой сложные гетерогенные системы, электрофизические свойства которых определяются такими факторами, как минеральный состав, структура и текстура, водонасыщенность и т.д., обладающими значительной пространственной изменчивостью, интерпретация данных рассматриваемых измерений относительно часто оказывается затруднительной.

Несмотря на то что большинство из обозначенных выше эмиссионных (пассивных) методов геоконтроля характеризуются высоким уровнем теоретических разработок и соответствующего аппаратного и методического обеспечения, они обладают рядом ограничений.

Как уже говорилось, главным недостатком методов ЭМИ (как и методов АЭ) является высокий уровень электромагнитных и акустических шумов, характерный для горных выработок с работающим оборудованием, которые вносят существенные осложнения в процедуры выделения полезных сигналов и последующей идентификации по ним геомеханических событий. Кроме того, эффективно применяемые на практике указанные методы геоконтроля не позволяет явным образом связать количество регистрируемых импульсов и вариации напряжений во времени, а информативность таких измерений напрямую зависит от способов установки датчиков.

Частично преодолеть обозначенные трудности позволяет метод бесконтактной диагностики деформационных процессов в объемах грунтов и горных пород по регистрируемым данным о вариациях интенсивности инфракрасного (ИК–) излучения с их поверхности. Обзору исследований по применению данного метода для описания процессов деформирования материалов посвящен следующий раздел.

1.2.2.2 Исследования электромагнитного излучения в инфракрасном диапазоне

Известно, что одним из дополнительных параметров, позволяющих повысить информационную эффективность оценки геомеханического состояния породного массива, являются вариации теплового поля, сопутствующего процессам деформирования горных пород [87]. Например, в работе ИПКОН РАН [166] показано, что изменение температуры угольного пласта является информативным показателем НДС его призабойной зоны. Данным показателем четко выделяются зоны повышенного горного давления и зоны разгрузки.

В термодинамике твердого тела принято выделять «термоупругий» и «термопластический» эффекты, связывающие температурные изменения термодинамической системы с приложенным к ней механическим давлением [167 – 169].

В классических опытах Джоуля, Вебера и др. [167], выполненных в середине 19 века, было показано, что при адиабатическом растяжении тела с положительным коэффициентом термического расширения температура понижается, а при сжатии возрастает. Такое явление, «обратное» изменению размеров тела при изменении температуры, заключающееся в изменении температуры тела при его упругом нагружении, в литературе обозначено как «термоупругий эффект».

Хорошим приближением в описании «термоупругого» эффекта является формула Кельвина [170]:

$$\Delta T = \frac{\alpha T_0}{\rho C_p} \cdot \Delta \Pi, \quad (1.1)$$

где T_0 и ΔT – начальная температура тела и ее изменение при нагружении, $\Delta \Pi$ – изменение первого инварианта тензора напряжения, α – линейный коэффициент термического расширения, C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении.

Изменение температуры материала, возникающее в результате деформационных процессов, можно измерять различными способами. Среди методов измерения выделяют контактные – они предполагают использование термопар, фиксируемых на поверхности образцов, – и бесконтактные, которые активно развиваются в последние годы [171].

Несмотря на то, что контактные методы измерения температуры твердых тел позволяют в настоящее время фиксировать ее вариации с высокой точностью и чувствительностью ($\Delta T \approx 0,001$ К) [172], надежное размещение термопар в глубоких скважинах или на поверхностях участков несвязанных грунтов оказывается чрезвычайно трудоемким или невозможным.

Бесконтактные методы измерения изменений температуры основаны на способности тел излучать электромагнитные волны в инфракрасном (ИК) диапазоне спектра [173, 174]. ИК–излучение занимает широкий диапазон электромагнитного спектра с длинами волн от 0,75 мкм до 1000 мкм, находясь между видимым светом и радиоволнами (Рисунок 1.4).

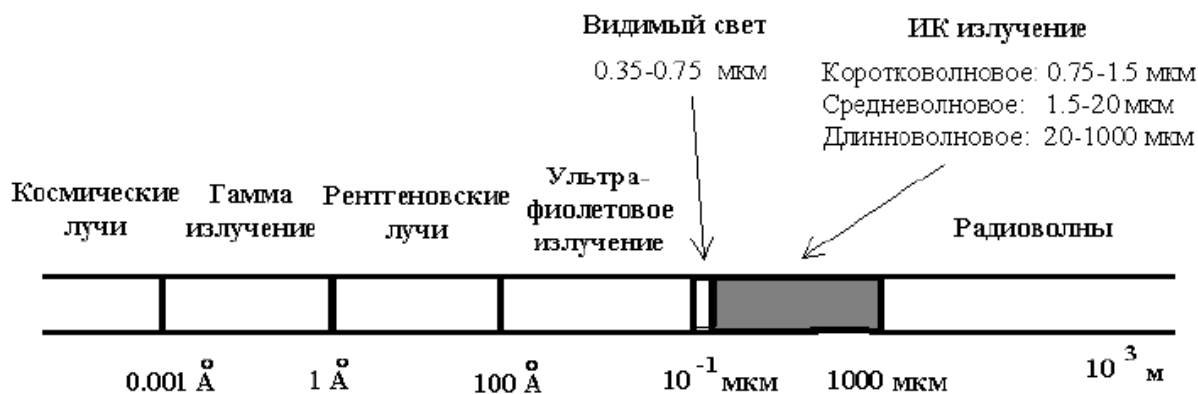


Рисунок 1.4 – Спектр электромагнитного излучения

Для абсолютно черного тела спектральная плотность энергетической светимости $r_{\lambda,T}$ (мощность излучения с единицы поверхности в единичном интервале длин волн) задается формулой Планка [173, 174]:

$$r_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\frac{hc}{e\lambda kT} - 1}, \quad (1.2)$$

где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; λ – длина волны [м]; T – температура [К].

Для того, чтобы оценить интенсивность излучения $W_{\lambda_1 \rightarrow \lambda_2}$ в диапазоне длин волн от λ_1 до λ_2 , нужно проинтегрировать $r_{\lambda,T}$ по λ [173, 174]:

$$w_{\lambda_1 \rightarrow \lambda_2}(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\frac{hc}{e\lambda kT} - 1} d\lambda. \quad (1.3)$$

Максимум спектральной плотности энергетической светимости $r_{\lambda,T}$ при температуре объектов от 0 до 100 С° приходится на интервал длин волн $\Delta\lambda$ от 8 до 10 мкм [173, 174]. Данное обстоятельство во многом обуславливает эффективность использования именно ИК-излучения для решения задач неразрушающего контроля.

В диапазоне длин волн от 0 до ∞ интенсивность электромагнитного излучения с поверхности тела можно оценить с помощью закона Стефана – Больцмана [173, 174]:

$$w(T) = \varepsilon_T \sigma T^4, \quad (1.4)$$

где $\varepsilon_T < 1$ – коэффициент излучательной способности, $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана–Больцмана.

Коэффициент излучательной способности ε_T является безразмерным и характеризует долю суммарного (по всему спектру) излучения данного материала от излучения абсолютно черного тела при той же температуре. Коэффициент излучательной способности зависит от вида материала, температуры, состояния излучающей поверхности и др. Сведения о характере этих зависимостей, а также значения коэффициента для многих материалов приведены в соответствующей литературе, например, в [171].

Исходя из изложенного выше, для бесконтактного изучения термомеханических эффектов, возникающих при деформировании твёрдых тел, наибольшую эффективность демонстрируют преобразователи, работающие по принципу регистрации изменений параметров теплового потока, исходящего с поверхности исследуемых объектов. При разработке первичных ИК–преобразователей наиболее часто используют такие явления, как возникновение термо–ЭДС или зависимость сопротивления вещества от температуры. Наиболее распространенными первичными преобразователями ИК–излучения являются металлические или полупроводниковые болометры, термоэлементы, а также оптико–акустические и пирозлектрические приемники [173, 174].

Belgen М.Н. внес значительный вклад в развитие бесконтактной инфракрасной диагностики изменений напряженного состояния твердых тел [175]. В его работах впервые были реализованы эксперименты по анализу термоупругих напряжений в подвергавшихся одноосному растяжению образцов изготовленных из различных конструкционных материалов: сталей, сплавов (алюминиевых, медных, магниевых), оргстекла, углепластика и др. Однако невысокая чувствительность первых ИК–радиометров не позволяла исследовать малые изменения температуры.

В работе [176] исследовались тепловые эффекты, связанные с пластическими деформациями в ряде металлов. Выведены уравнения, описывающие изменение

температуры при упругих и пластических деформациях, которые затем проверялись экспериментально. Например, было экспериментально установлено, что в процессе адиабатического деформирования образцов высокоуглеродистой стали формируется резкий обратный градиент температуры. Его возникновение обусловлено ростом напряжений за пределом упругости материала.

Возможность использования ИК – радиометрии для оценки амплитуд динамических напряжений при усталостном нагружении материалов [177]. Система SPATE (Stress Pattern Analysis by Thermal Emission) состоит из сканирующего ИК–радиометра с компьютерным управлением, который измеряет небольшие изменения температуры, возникающие на поверхности твердотельного материала, подвергающегося циклической нагрузке.

Принцип электронного пространственного сканирования реализуется с использованием разработанных в конце XX–го века детекторах инфракрасного излучения нового поколения. В англоязычной литературе такой тип приемников называют матрицами, визуализирующими распределение температуры на поверхности объекта (термоизображения или термограммы). Качество термограмм определяется количеством и техническими параметрами пикселей - отдельных светочувствительных элементов матрицы, регистрирующих инфракрасное излучение и преобразующих его в электрический сигнал, который затем отображается как точка на экране с определённым цветом или оттенком серого – в зависимости от температуры исследуемого объекта.

Хотя SPATE создает достаточно четкие термоизображения испытываемых материалов, скорость сбора данных, оказалась недостаточной для промышленных процессов. Кроме того качество получаемых изображений в значительной степени зависит от коэффициента излучательной способности ε_T . Поэтому образцы, которые не обладают достаточно большими значениями ε_T , необходимо окрашивать в черный цвет.

В целях повышения эффективности использования ИК–радиометрии для анализа термоупругих напряжений были разработаны новые измерительные системы. Такие системы обладают гораздо более высокой скоростью сбора данных

по сравнению с SPATE, а также обеспечивают возможность составления карты напряжений испытываемых образцов материалов (или деталей машин) в реальном времени. Одна из таких систем – Sapphire – L1, в состав которой входит матрица детекторов ИК – излучения на основе теллурида кадмия и ртути [178].

Другой аналогичной системой является FAST system, позволяющая сократить время, необходимое для проведения сканирования. Однако в данной системе используются несколько детекторов с неодинаковой чувствительностью, что приводит к существенным погрешностям при формировании термограмм [179].

В системе Deltatherm принцип сканирования основан на матричном детекторе с фокальной плоскостью на антимониде индия [180]. Это позволяет получать термоизображения за гораздо более короткое время, чем это требуется при использовании SPATE, хотя соотношение сигнал/шум для регистрируемых сигналов оказывается более низким.

В последние десятилетия в области исследования механического состояния различных конструкционных материалов с применением рассмотренных или подобных бесконтактных терморadiометрических измерительных систем наиболее существенные результаты были получены в работах зарубежных исследователей: Chrysochoos A., P. Stanley, J. M. Dulieu-Barton, Pieczyska E.A., Muneer K.M. и др. [181–185].

Исследования A. Chrysochoos посвящены исследованию гистерезисных эффектов в циклически нагружаемых полимерах по данным ИК–радиометрии. В статье [181] подчеркнуты преимущества комплексного использования цифровых изображений поверхности испытываемых образцов и ИК–радиометрии для анализа динамики изменения параметров петель механического гистерезиса, фиксируемых в ходе экспериментов.

В работах Stanley P. [182] и Dulieu–Barton J. M. [183] исследована возможность контроля скорости развития повреждений во время испытаний композитных материалов с помощью ИК–радиометрии. Было показано, что по мере роста повреждений, инициированного внешним механическим воздействием, в теле материала происходит локальное повышение температуры, которое можно

измерить с помощью инфракрасного (ИК–) детектора.

Исследования Pieczyska E.A. [184] и Muneer K. M. [185] посвящены исследованию проявлений термомеханических эффектов в композиционных материалах (стеклоэпоксидные ламинаты и полиуретановые полимеры с памятью формы) при различных схемах нагружения. В частности, установлено, что точка перехода между стадиями упругого и упругопластического деформирования надежно фиксируется средствами ИК–радиометрии. Показано, что при циклических испытаниях указанных материалов угол наклона зависимости изменения температуры образцов от их продольной деформации меняет свое значение с увеличением номера цикла нагрузки–разгрузки при усилиях, соответствующих как упругой, так и пластической стадиям деформирования.

Среди российских исследований следует отметить работы К.Б. Абрамовой и Е.С. Лукина [186, 187], в которых приводятся результаты исследования инфракрасного излучения, сопровождающего процессы деформирования и разрушения образцов из металлов и сплавов при различных способах нагружения.

Например, в исследованиях Е.С. Лукина [187] использовалась измерительная система «Thermovision 550», отличительной особенностью которой является ее чувствительность, равная 0,1 К. В частности, в ходе проведенных экспериментов обоснована возможность определения стадийности процесса деформирования и разрушения конструкционных сталей по характерным изменениям температуры испытываемых образцов.

В статье Е.А. Мойсейчика [188] обоснована возможность применения ИК–радиометрии для исследований закономерностей зарождения, распространения и локализации пластической деформации в стальных элементах при их деформировании при комнатных температурах и после предварительного охлаждения.

Несомненный интерес представляют работы О.А. Плехова [189, 190], в которых описаны эксперименты по выявлению взаимосвязи термических, акустикоэмиссионных и структурных предвестников разрушения с процессом зарождения и роста усталостных трещин в металлах.

Первые опыты, в которых фиксировалось изменение потока ИК-излучения с поверхности образца горной породы, подвергаемого нагружениям на прессе, были выполнены в конце прошлого столетия сотрудниками НИИОСП им. Н.М. Герсевича: Э.А. Мотовиловым, А.А. Морозовым, С.В. Пригорневой и В.И. Шейниным [191, 192].

В работах [193, 194] делается вывод о возможности использования измерений изменений параметров инфракрасного (ИК-) излучения с поверхности горных пород для диагностики их напряженного состояния и идентификации происходящих в них механических процессов, и описываются методика и результаты исследований, выполненных для обоснования предлагаемого подхода на «малых» образцах скальных пород в условиях одноосного сжатия. Полученные результаты позволили сделать вывод об эффективности разрабатываемой методики для диагностики быстрых «квазиadiaбатических» упругих изменений во времени напряженного состояния геоматериалов.

Позднее Luong M.P. [195] продемонстрировал возможность использования ИК-радиометрии для наблюдения изменения механического состояния образцов бетона и горных пород, подвергнутых статическому сжатию и наложенному вибрационному возбуждению. В ходе экспериментов надежно фиксировался момент начала образования в образцах магистральных трещин, возникновение которых инициировалось вибрационной нагрузкой.

В работе В.В. Середина и А.С. Хрулева [196] с использованием тепловизора исследовались изменения температуры образца цемента в зоне магистральной трещины разрушения в условиях объемного напряженного состояния. Получены уравнения, позволяющие прогнозировать температуру материала в зоне магистральной трещины разрушения в зависимости от разрушающей нагрузки.

В статье И.Т. Мирсаяпова [197] излагается способ определения зон концентрации напряжений в железобетонных конструкциях при многократно повторяющихся циклических нагружениях. Для определения зон концентрации напряжений предлагается до циклического нагружения стабилизировать температурные характеристики конструкций, затем в процессе циклического

нагружения измерять температурные поля конструкций тепловизионной аппаратурой с последующим анализом и обработкой полученных термограмм.

Для оценки стадии деформирования геоматериалов L. Wu предложил индекс средней температуры инфракрасного излучения (Average Infrared Radiation Temperature – *AIRT*) как средство количественной характеристики ИК – излучения с поверхности образцов в процессе их нагружения [198].

AIRT – это среднее арифметическое значений температуры, зарегистрированных по всем пикселям инфракрасного тепловизионного изображения поверхности испытываемого образца горной породы в конкретный момент времени. В простейшем случае *AIRT* рассчитывается по следующей формуле [198]:

$$AIRT = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i, \quad (1.5)$$

где N – общее количество пикселей термоизображения, T_i – температура, измеренная в i – ом пикселе.

Необходимость введения указанного индекса обуславливается нестабильностью тепловизионной картинки, связанной как с недостаточной разрешающей способностью используемых детекторов, так и с влиянием теплообмена с окружающей средой (нарушением адиабатичности исследуемых процессов).

Несомненно, что *AIRT* является информативной характеристикой для количественного описания временной эволюции параметров инфракрасного излучения и последующей идентификации предвестников разрушения горных пород. Тем не менее, для более эффективного использования этого индекса в качестве предвестника развития деструктивных процессов в нагружаемых геоматериалах Н. Sun [199] предложил методологию, называемую коррекцией фонового теплового шума (Background thermal noise correction – BTNC).

Liqiang Ma предложена еще одна модификация изложенного выше метода [200, 201]. Для фиксации температурных аномалий инфракрасного излучения в процессе нагружения горных пород и количественной оценки характеристик

инфракрасного излучения с их поверхности в качестве нового показателя для изучения временных характеристик изменения температурного поля был введен индекс, названный дисперсией дифференциальной температуры инфракрасного изображения (Variance Of Differential Infrared Image Temperature – *VDIIT*).

Так, например, работа [201] посвящена исследованию характеристик ИК – излучения, сопутствующего деформированию образцов песчаника. Описывается двумерная функция $\varphi_p(x, y) = f_{n+1}(x, y) - f_n(x, y)$, отражающая изменение температуры $\Delta T_n = T_{n+1} - T_n$ поверхности нагружаемого образца песчаника, где n – номер термограммы, зарегистрированной в произвольный момент времени наблюдения t_n , а $f_n(x, y)$ и $f_{n+1}(x, y)$ – значения параметра ИК-излучения, оцениваемого соответственно по n – й и $(n+1)$ –й термограммам, а x и y представляют номера строк и столбцов их пиксельных матриц ($x = 1, 2, \dots, M$, $y = 1, 2, \dots, N$, M и N – максимальные значения числа строк и столбцов). Тогда дисперсия дифференциальной температуры инфракрасного изображения (*VDIIT*) определяется как:

$$VDIIT_P = \frac{1}{M} \frac{1}{N} \sum_{Y=1}^M \sum_{X=1}^N [\varphi_n(x, y) - AIRT_n]^2 \quad (1.6)$$

где $AIRT_n = \frac{1}{M} \frac{1}{N} \sum_{Y=1}^N \sum_{X=1}^M \varphi_n(x, y)$.

Приведенные в работах [200, 201] результаты исследований показывают, что моменты существенных вариаций индекса *VDIIT* образцов геоматериалов коррелируют с фиксируемыми аналогичными моментами изменений напряжений в испытываемых на одноосное сжатие образцов горных пород. Сделан вывод о том, что индекс дисперсии *VDIIT* более чувствителен к макроразрушениям, чем показатель *AIRT* и может эффективно использоваться в качестве надежного оценочного средства для выявления предвестников разрушения или проявлений неустойчивости горных пород.

Rongxi Shen разработал подход к оценке геомеханического состояния горных пород на основе данных о изменениях максимальной температуры инфракрасного излучения (*MIRT*) с их поверхности. В работе [202] с использованием индекса *MIRT*

были выявлены предвестники разрушения для водонасыщенных образцов песчаника, испытываемых в условиях одноосного сжатия.

В работе Kewang Cao [203] разработан новый метод выявления предвестников разрушения горных пород, основанный на оценке деформационно–прочностных характеристик геоматериалов при одноосном циклическом нагружении и разгрузке на основе данных о вариациях параметров инфракрасного излучения. Введенный индекс *LURR* определяется на основе таких ИК–показателей, как средняя температура инфракрасного излучения (*AIRT*) и скорость изменения температуры инфракрасного излучения (*IRTR*). Так же Kewang Cao в работе [204] была исследована связь вариаций индекса *AIRT* с изменениями объемной деформации образца геоматериала в процессе его нагружения. Сделан вывод о более детальном изучении связи указанных параметров для выявления особенностей отклика ИК–излучения с поверхности геоматериала на разных стадиях его деформирования.

Возможность оценки напряженно–деформированного состояния элементов строительных конструкций по данным ИК–радиометрии исследовалась в статье Lou Q. и He X. [205].

В заключение следует отметить, что во всех относительно современных рассмотренных работах в области ИК–радиометрии горных пород [195 – 205], несомненно, содержащих ряд новых предложений по технике выполнения экспериментов и методике интерпретации данных, не уделено внимания необходимым условиям проведения эффективных терморadiационных измерений, а именно, адиабатичности исследуемых процессов. Вследствие этого зависимости параметров ИК–излучения от времени при испытаниях геоматериалов различных типов (песчаник, уголь и др.), представленные в этих сообщениях, во многом теряют свою представительность.

К числу основных практических задач прикладной геомеханики и геофизики, для решения которых с успехом могут быть использованы результаты ИК–радиометрических измерений, относятся:

- 1) оперативный контроль за динамикой зон разгрузки в массиве при

экспериментальных исследованиях напряженного состояния массива и при выполнении горнопроходческих и очистных работ.

2) оперативный контроль за динамикой деформационных процессов в эксплуатируемых подземных выработках, обеспечивающий своевременное выполнение мероприятий по стабилизации работы сооружения и позволяющий избежать возможные аварии.

Для повышения надежности оценок параметров проявлений динамических процессов при разработке месторождений подземным способом необходима разработка рациональных принципов комплексирования ИК–радиометрии с другими геофизическими методами, например, с методом акустической эмиссии (АЭ). Представляется весьма перспективной идея системы комплексного мониторинга массивов горных пород, в которой измерения будут направлены на получение информации различных типов, относящихся к различным этапам развития катастрофических процессов в массиве. Последнее открывает пути к повышению достоверности предсказаний возможной активизации негативных геомеханических процессов, а также определяет возможность взаимного тестирования результатов такого прогноза.

Выводы по Главе 1 и постановка задач исследований

Проведенный анализ научно–технической литературы показал, что эксперименты по терморadiационным исследованиям механических процессов, несмотря на возросший интерес исследователей к этой методике, находятся еще на ранней (постановочной) стадии развития и говорить об их прецизионности и готовности к использованию в натурных условиях пока еще рано. Работы же по влиянию изменчивости физико–механических свойств геоматериалов на параметры сопутствующего процессам деформирования теплового излучения носят единичный характер. Таким образом, проведенный в первой главе анализ показал, что до настоящего времени не решен ряд задач теоретического, экспериментального, методического и аппаратного характера, связанных с созданием метода ИК–радиометрических измерений применительно к задачам геоконтроля.

На основе анализа материалов первой главы были сформулированы следующие **задачи диссертационного исследования**:

1) Выполнить анализ применения методов инструментального контроля параметров напряженно–деформированного состояния породного массива, в т.ч. базирующихся на эффектах различной физической природы (акустических, электромагнитных, радиационных и др.).

2) Создать аппаратно–измерительный комплекс и испытательные стенды для одновременной регистрации деформационно–прочностных, акустоэмиссионных и термоэмиссионных параметров при различных режимах нагружения образцов геоматериалов;

3) В рамках лабораторных экспериментов исследовать изменения во времени акустоэмиссионных параметров, а также интенсивности инфракрасного излучения образцов геоматериалов при различных схемах и режимах их нагружения;

4) Разработать алгоритмы обработки нестационарных временных рядов, особенностью которых является изменчивость частотных диапазонов полезной и шумовой их составляющих, для эффективной идентификации изменений во

времени параметров, характеризующих деформационные процессы в нагружаемых геоматериалах по данным ИК–радиометрии;

5) Теоретически и экспериментально обосновать возможность использования результатов терморadiометрических измерений для диагностики изменений напряженно–деформированного состояния горных пород и их структурных особенностей в процессе нагружения;

6) Разработать аппаратное и методическое обеспечение терморadiометрического мониторинга геомеханического состояния массивов грунтов и горных пород.

ГЛАВА 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И АППАРАТУРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕСКОНТАКТНОЙ ТЕРМОРАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ГЕОМАТЕРИАЛОВ

2.1 Моделирование влияния микротрещин на изменения температуры геоматериалов при их деформировании

2.1.1 Выбор и обоснование расчетной механической модели среды, постановка задачи моделирования

Расчёты приращения температуры для геоматериалов под нагрузками, далёкими от предельных, показывают, что величины ΔT в таких условиях обычно составляют $10^{-2} - 10^{-3}$ К. Например, для мрамора (при $\alpha = 0,7 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$, $C_p = 10^3 \text{ Дж / (К} \cdot \text{кг)}$, $\rho = 2700 \text{ кг / м}^3$) в соответствии с (1.1) при адиабатическом изменении напряжения на $\Delta \sigma = 5 \text{ МПа}$ ($\sim 10\%$ от прочности на сжатие) получаем $\Delta T \approx 0,004 \text{ К}$. Однако необходимо помнить, что эти оценки получены в рамках модели однородной и изотропной среды с использованием формулы (1.1), что потенциально снижает их достоверность для реальных геоматериалов.

Для повышения надежности оценок изменения температуры ΔT деформируемого геоматериала предлагается модель изотропной среды с хаотически ориентированными трещинами [206]. Рассматривается случай нагружения геоматериала в поле сжимающих напряжений. Изменение напряженного состояния среды с трещинами приводит к подвижке их берегов, а за счет трения между соприкасающимися в условиях сжатия берегами трещин в среде возникают диссипативные процессы.

Выберем в рассматриваемой среде образец в виде прямоугольного параллелепипеда с длиной ребра L , который подвержен осесимметричному напряжению $\sigma_{33} < \sigma_{22} = \sigma_{11}$ (Рисунок 2.1).

Рассматриваются условия, когда в образцах отсутствуют макротрещины, т. е. средний размер микротрещин R существенно меньше размеров образца $R \ll L$. При

этом можно считать, что большая часть трещин располагается в объёме на расстоянии от свободной поверхности, существенно превышающем размер трещины. Таким образом, большую часть трещин в образце можно рассматривать как точечные источники тепла в бесконечной среде.

Считаем, что концентрация микротрещин мала, т. е. расстояние между трещинами значительно больше их размеров. Степень неоднородности материала с трещинами может задаваться параметром $\Omega = nR^3$, где $n = \frac{N}{L^3}$ – объёмная концентрация трещин (N – количество трещин). При условии $\Omega \ll 1$ трещины можно считать изолированными и не учитывать их взаимодействие между собой.

Пусть изменение напряжения происходит вдоль оси OZ от значения σ_{33} до значения $\sigma_{33} + \Delta\sigma_{33}$ при постоянных величинах $\sigma_{11} = \sigma_{22}$. Рассмотрим поведение в данном поле изолированной дискообразной трещины радиуса R (Рисунок 2.1). Трещина ориентирована таким образом, что угол между направлением σ_{33} (осью OZ) и нормальным напряжением σ к её плоскости равен φ , а центр трещины находится в начале координат, в точке O (Рисунок 2.1).

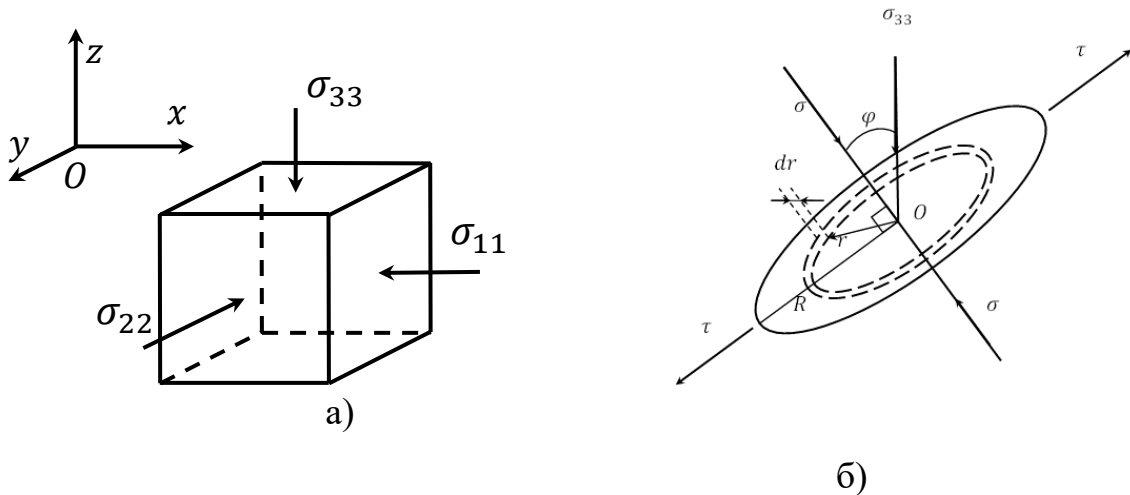


Рисунок 2.1 – Нагружение образца с трещиной

Считаем, что сдвиговые напряжения τ_f в устье трещины обусловлены действием силы сухого трения, которое задаётся уравнением Кулона [22, 28, 207]:

$$\tau_f = \tau_0 + \mu|\sigma|, \quad (2.1)$$

где μ – коэффициент трения, σ – нормальное напряжение к поверхности трещины, τ_0 – сцепление. Если действующие на поверхность трещины сдвиговые напряжения $|\tau| > \tau_f$ (Рисунок 2.1) или эффективное сдвиговое напряжение $\tau_S = (|\tau| - \tau_f) > 0$, то будет наблюдаться перемещение берегов трещины в поле сжимающих напряжений. При $|\tau| < \tau_f$, ($\tau_S < 0$) трещина не растет.

Работа сил трения ($\tau_S > 0$) при движении берегов трещины приводит к диссипации энергии, а сами трещины можно рассматривать как объёмные источники тепла Δq [208, 209]:

$$\Delta q = \iint_{U,S} |\tau| dU(\tau_S) dS, \quad (2.2)$$

где $dU(\tau_S)$ – бесконечно малое относительное смещение берегов трещины, $dS = 2\pi r dr$ – элемент поверхности трещины, а интегрирование ведётся по всей поверхности трещины (Рисунок 2.1).

Для среды, ослабленной закрытыми дисковыми трещинами, изотропно распределенными по углам, в [210] получено выражение для изменения энергии одной трещины радиуса r в сложнапряженном состоянии. Оно имеет вид:

$$dq = \frac{16}{3E} \mu R^3 (\sigma_{33} - \sigma_{11}) \cos^2 \varphi \sin 2\varphi [(1 - 2\nu_0)y + 3]^{-1} \times \\ \times \left\{ [3 + 2(1 - 2\nu_0)y - (1 - 2\nu_0)^2 y^2] d\sigma_{33} - \sigma_{33} [3 + (1 - 2\nu_0)^2 y^2] \frac{dy}{y} \right\} H(\tau_S), \quad (2.3)$$

где ν_0, E_0 – коэффициент Пуассона и модуль Юнга сплошной упругой среды; ν, E – коэффициент Пуассона и модуль Юнга трещиноватой среды; $y = \frac{E}{E_0}$; φ – угол между направлением оси OZ и нормалью трещины, $H(\tau_S)$ – единичная функция Хевисайда.

Так же получено

$$y = 1 - \frac{32}{3} \Omega \cdot (f(\varphi_2) - f(\varphi_1)) \left[\frac{1-\nu^2}{2-\nu} - \frac{3+(1-2\nu_0)^2 y^2}{2y(3+2(1-2\nu_0)y)} \sigma_{33} \frac{dy}{d\sigma_{33}} \right] \cdot H(\tau_S) \quad (2.4)$$

$$\varphi_1 = \frac{1}{2} (\beta + \arcsin[(\sin\beta(\sigma_{33} + \sigma_{11}) - 2\tau_0 \cos\beta(\sigma_{33} - \sigma_{11}))^{-1}]),$$

$$\varphi_2 = \frac{\pi}{2} + \beta - \varphi_1, \beta = \arctg(\mu), \Omega = nR_*^3, R_*^3 = \int R^3 F(R) dR, \quad (2.5)$$

где φ_1, φ_2 – границы интервалов углов, в пределах которого возможна подвижка берегов трещин, n – концентрация трещин.

Из соотношения (2.4) ввиду малости параметра Ω получаем $y = 1$. Для упрощенной оценки вклада трещин в изменение температуры в данной работе принято что: $\tau_0 = 0$ и $\sigma_{11} = 0$.

Тогда соотношения (2.3) и (2.5) упрощаются к виду:

$$\Delta q = \frac{16}{3E} \mu R^3 \frac{1-\nu^2}{2-\nu} |\sigma_{33} - \sigma_{11}| \Delta \sigma_{33} \cos^2 \varphi \sin 2\varphi, \quad (2.6)$$

где угол φ в силу осесимметричности распределения напряжения ($\sigma_{11} = \sigma_{22}$) изменяется в пределах $0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$ (Рисунок 2.1).

Для того чтобы оценить вклад в температуру только от трещин, рассмотрим упругую среду с объемными источниками тепла. При этом вклад за счёт упругого деформирования ввиду его малости рассматриваться не будет, поэтому уравнение теплопроводности может быть записано в следующем виде [211, 212]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \rho q, \quad (2.7)$$

где k – коэффициент теплопроводности.

Как уже отмечалось ранее, концентрация и размеры трещин позволяют считать их невзаимодействующими между собой. Нагрев одной трещины не сказывается на остальных трещинах. Это позволяет рассматривать каждую трещину как изолированный точечный источник тепла.

Приближенно можно считать, что в момент приложения нагрузки тепло выделяется мгновенно и трещина рассматривается как мгновенный точечный источник тепла.

Если в момент времени $t = t_0$ поместить в точку с координатами (ξ, η, ζ) точечный источник энергии Δq_i , то температура в произвольной точке (x, y, z) среды будет зависеть от времени следующим образом:

$$\Delta T_i(x, y, z, t) = \frac{1}{c_p \rho} \frac{\Delta q_i}{\left(2\sqrt{\pi \cdot a^2 \cdot (t - t_0)} \right)^3} \exp \left[-\frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}{4a^2(t-t_0)} \right], \quad (2.8)$$

где Δq_i – количество тепла, выделяемое мгновенным источником, $a = \frac{k}{c_p \rho}$ – коэффициент температуропроводности, k – коэффициент теплопроводности материала.

Если подставить в (2.8) вместо Δq_i выражение (2.6), получим, что одна трещина, расположенная в точке (ξ, η, ζ) , при подвижке берегов за счёт изменения напряжения на $\Delta \sigma_{33}$, в условиях одноосного сжатия приводит к следующему изменению температуры в точке (x, y, z) в момент времени t :

$$\Delta T_i(x, y, z, t) = \frac{16}{3E} R^3 \frac{1-\nu^2}{2-\nu} \mu \sigma_{33} \Delta \sigma_{33} \cos^2 \varphi \sin \varphi \sin 2\varphi \times \\ \times \frac{1}{c_p \rho} \frac{1}{\left(2\sqrt{\pi \cdot a^2 \cdot (t-t_0)}\right)^3} \exp \left[-\frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}{4a^2(t-t_0)} \right], 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}. \quad (2.9)$$

Полученное выражение (2.9) можно использовать для оценки вклада трещин в вариацию температуры нагруженного образца. Для малых концентраций трещин эффект от нескольких трещин можно считать равным сумме эффектов от каждой из трещин в отдельности:

$$\Delta T(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N \Delta T_i(x, y, z, t). \quad (2.10)$$

При расчетах, проведенных для образцов горных пород, рассматриваемые изолированные микротрещины хаотически ориентированы и расположены случайным образом. Случайное распределение координат трещин и их ориентация задавались генератором случайных чисел с использованием метода Монте–Карло [213]. При этом процедура задания координат трещин исключала их попадание на поверхность образца, а также наложение трещин друг на друга.

Угол φ для трещин выбирался из интервала, в котором возможна подвижка берегов $0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$ в соответствии с (2.9). Углам присваивались случайные значения из указанного интервала.

Общий вид модели кубического образца с длиной ребра L и трещинами, случайным образом распределёнными по объёму представлена на Рисунке 2.2.

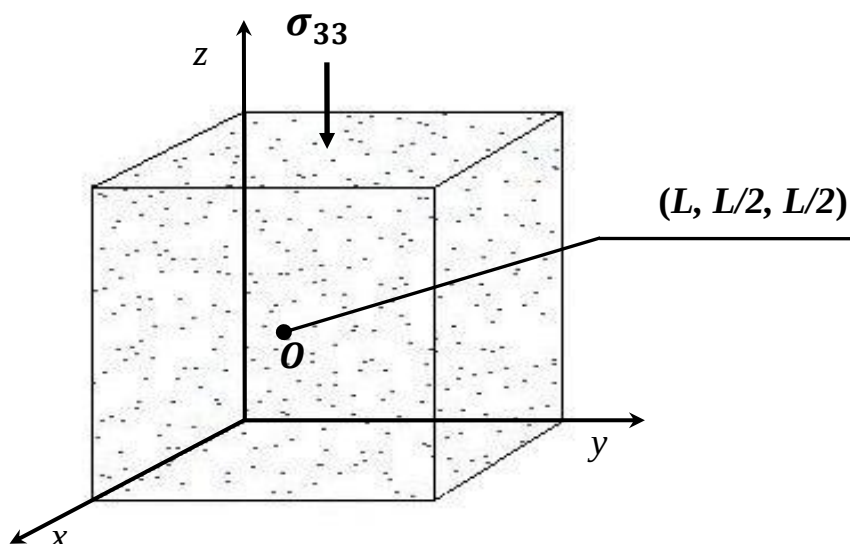


Рисунок 2.2 – Модель кубического образца с длиной ребра L и трещинами, случайным образом распределёнными по объёму. Точка O на поверхности образца

Рассматривался отклик среды на приложенную нагрузку в виде «ступеньки». В режиме одноосного сжатия при этом до приложения «ступеньки» среда уже нагружена до уровня напряжения σ_{33} , а затем мгновенно нагружалась до $\sigma_{33} + \Delta\sigma_{33}$ (Рисунок 2.3).

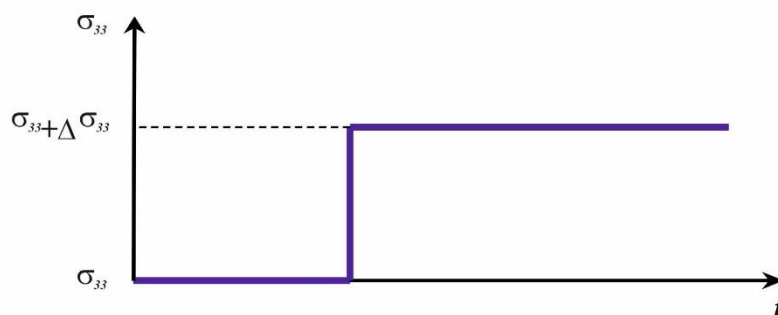


Рисунок 2.3 – Общий вид зависимости нагрузки от времени $\sigma_{33}(t)$, используемой в расчетах

Моделируемый экспериментальный образец имел форму куба с гранью $L = 0,1$ м, размер дисковых трещин R выбирался в интервале $0,1 - 2$ мм. Количество трещин N для каждого фиксированного размера определялось таким образом,

чтобы величина параметра, характеризующего степень трещиноватости среды, не превышала $\Omega = 0,1$.

Для расчётов были выбраны горные породы с существенно различающимися значениями физико-механических характеристик [214]. Значения некоторых используемых в расчетах характеристик приведены в Таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Физико–механические параметры горных пород, использовавшиеся при расчетах

Параметры горной породы	Гранит	Известняк
Плотность ρ , кг/м ³	2681	2592
Удельная теплоемкость C_p , Дж/(кг·К)	960	930
Коэффициент теплопроводности k , Вт/(м·К)	3,49	1,7
Коэффициент Пуассона ν	0,2	0,3
Коэффициент трения μ	0,7	0,6
Предел прочности на сжатие σ_c , МПа	90,7	55,9
Коэффициент излучательной способности ε_T ,	0,9	0,8
Коэффициент линейного расширения α , $10^{-5} K^{-1}$	1,12	1,005

2.1.2 Оценка приращения температур изотропной среды с хаотически ориентированными и равномерно распределенными по ее объему трещинами при изменении напряженно-деформированного состояния

С помощью алгоритмической процедуры, реализованной в программном комплексе (ПК) Mathematica, были заданы координаты для N трещин, равномерно распределенных по объему, описанной выше модели образца. Для такого распределения может быть рассчитана зависимость изменения температуры образца геоматериала от времени $\Delta T(t)$. Указанная зависимость необходима для оценки значения времени t_{max} , соответствующему максимальной величине приращения температуры тела ΔT_{max} при нагрузке $\sigma_{33} + \Delta\sigma_{33}$ (Рисунок 2.4).

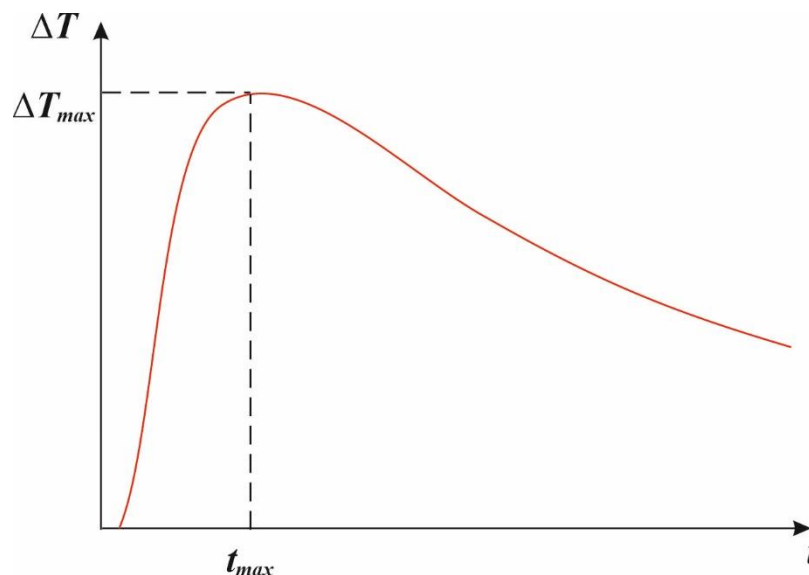


Рисунок 2.4 – Схема определения значения t_{max}

Само же значение t_{max} определяет скорость изменения нагрузки, при которой соответствующие изменения температуры могут надежно регистрироваться.

Расчет проведен для двух горных пород (гранит и известняк), физико-механические характеристики которых приведены в Таблице 2.1. Ниже приводятся результаты расчета для трёх комбинаций значений σ_{33} и $\Delta\sigma_{33}$. При этом число трещин $N = 100$, а их размер $R = 0,5$ мм. Графики полученных зависимостей $\Delta T(t)$ представлены на Рисунках 2.5 – 2.7.

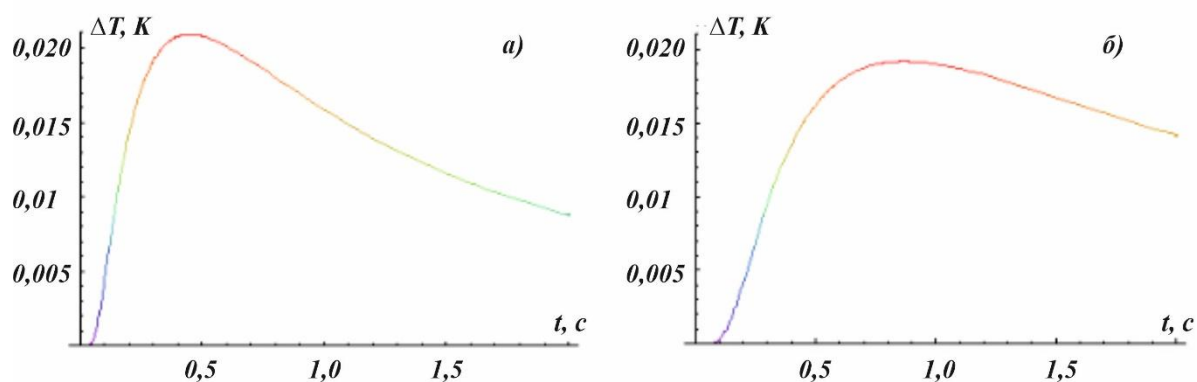


Рисунок 2.5 – Зависимость $\Delta T(t)$ для модельных образцов гранита (а) и известняка (б) при $\sigma_{33} = 3$ МПа и $\Delta\sigma_{33} = 0,2$ МПа

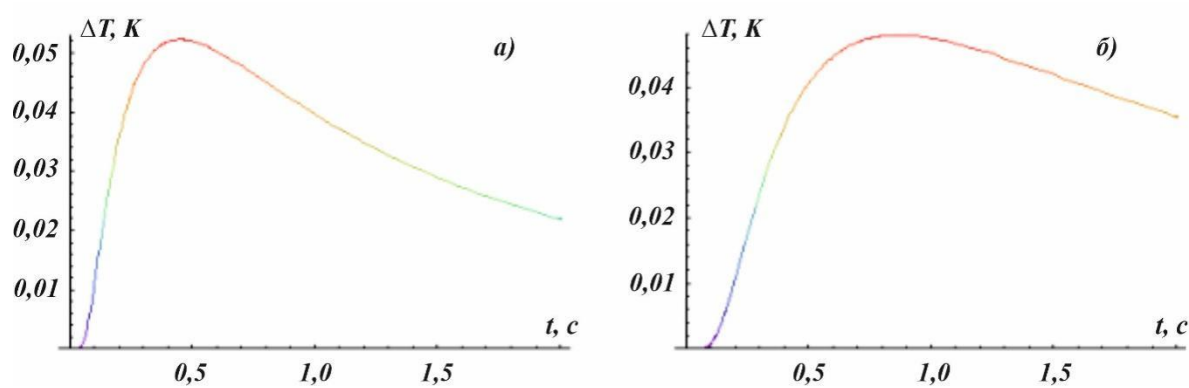


Рисунок 2.6 – Зависимость $\Delta T(t)$ для модельных образцов гранита (а) и известняка (б) при $\sigma_{33} = 3$ МПа и $\Delta\sigma_{33} = 0,5$ МПа

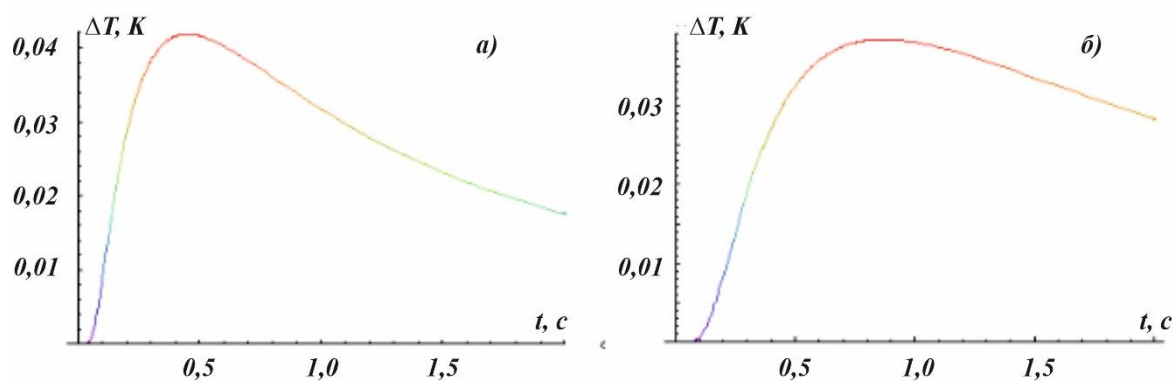


Рисунок 2.7 – Зависимость $\Delta T(t)$ для модельных образцов гранита (а) и известняка (б) при $\sigma_{33} = 6$ МПа и $\Delta\sigma_{33} = 0,2$ МПа

Следует отметить, что значения t_{max} , оцененные по графикам на рис. 2.5 – 2.7, принадлежат интервалу 0,2 – 0,7 с.

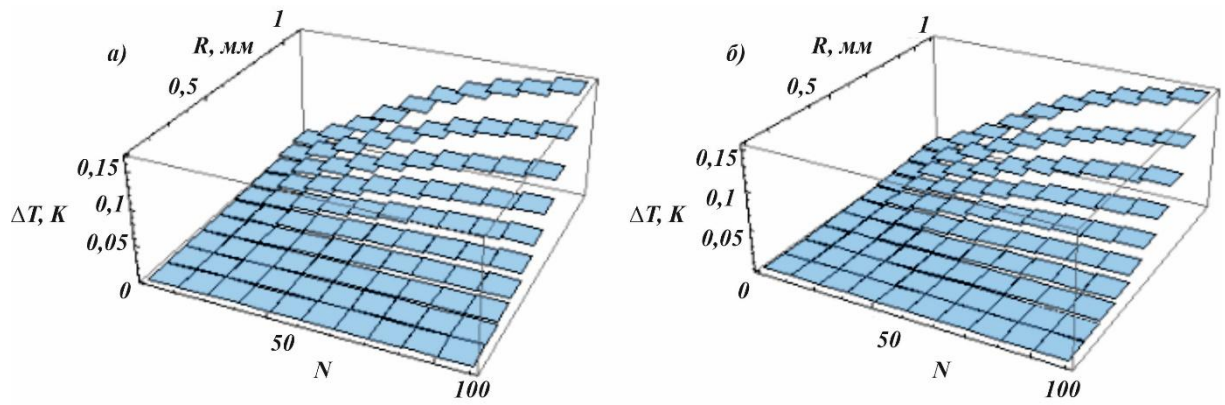


Рисунок 2.8 – Зависимость $\Delta T_{max}(N, R)$ для модельных образцов гранита (а) и известняка (б) при $\sigma_{33} = 3$ МПа и $\Delta\sigma_{33} = 0,2$ МПа

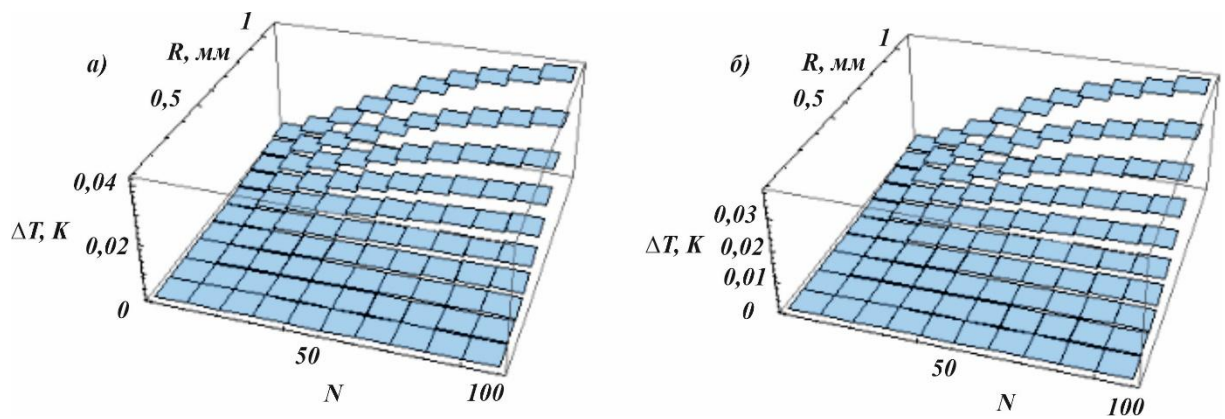


Рисунок 2.9 – Зависимость $\Delta T_{max}(N, R)$ для модельных образцов гранита (а) и известняка (б) при $\sigma_{33} = 3$ МПа и $\Delta\sigma_{33} = 0,5$ МПа

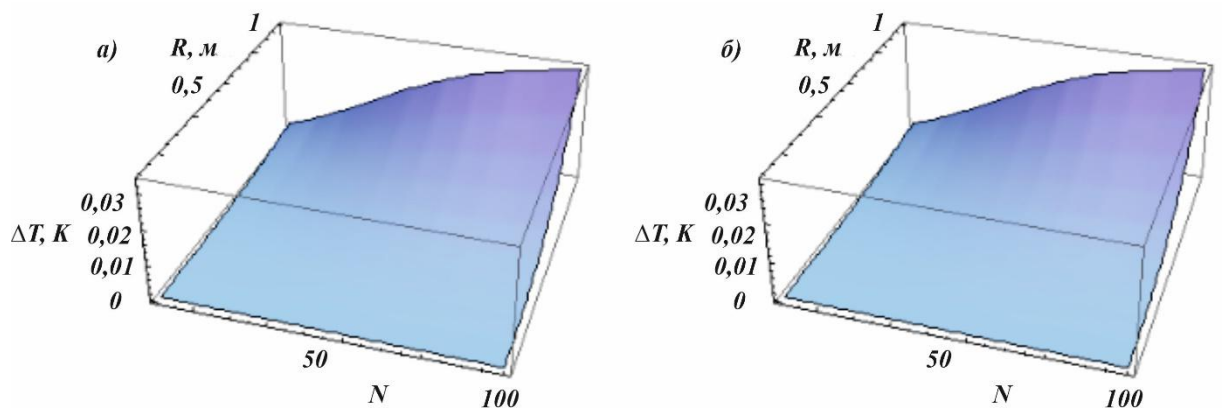


Рисунок 2.10 – Зависимость $\Delta T_{max}(N, R)$ для модельных образцов гранита (а) и известняка (б) при $\sigma_{33} = 6$ МПа и $\Delta\sigma_{33} = 0,2$ МПа

На втором этапе моделирования были проведены расчеты зависимостей $\Delta T(t)$ для обоих геоматериалов при указанных выше значениях σ_{33} и $\Delta\sigma_{33}$ при различных значениях $N \in 0, 10 \dots 100$ и $R \in 0, 0.1 \dots 1$ мм. Для каждой реализации было оценено максимальное приращение температуры ΔT_{max} . На Рисунках 2.8 – 2.10 представлены 3D–зависимости $\Delta T_{max}(N, R)$.

Результаты расчета, представленные на Рисунках 2.8 – 2.10, показывают, что значения ΔT_{max} , соответствующие указанным величинам нагрузки лежат в диапазоне 0,019 – 0,043 К. Результаты расчетов ΔT , произведенных для тех же геоматериалов по формуле Кельвина (1.1) при аналогичных значениях $\Delta\sigma_{33}$, принадлежат диапазону величин 0,0002 – 0,001 К, что как минимум на порядок ниже значений оценки, проведенной в рамках описываемой модели.

2.1.3 Оценка приращения температур изотропной среды с хаотически ориентированными и случайно распределенными по ее объему трещинами при изменении напряженно-деформированного состояния

Для нескольких реализаций случайного распределения трещин для модельных образцов гранита и известняка также были рассчитаны зависимости изменения температуры образца геоматериала от времени $\Delta T(t)$ при $\sigma_{33} = 6$ МПа и $\Delta\sigma_{33} = 0,2$ МПа и различных значениях количество трещин N и их размеров R .

Графики зависимостей $\Delta T(t)$, полученных таким образом для модельных образцов гранита и известняка при $N = 100$, $R = 0,5$ мм, представлены на Рисунках 2.11 и 2.12.

Зависимости $\Delta T(t)$ для гранита и известняка (Рисунки 2.11 и 2.12), также как и в случае равномерного распределения трещин (Рисунки 2.5 – 2.7), имеют характерный максимум, который достигается на временах 0,2 – 0,5 с, что позволяет фиксировать значения ΔT_{max} экспериментально.

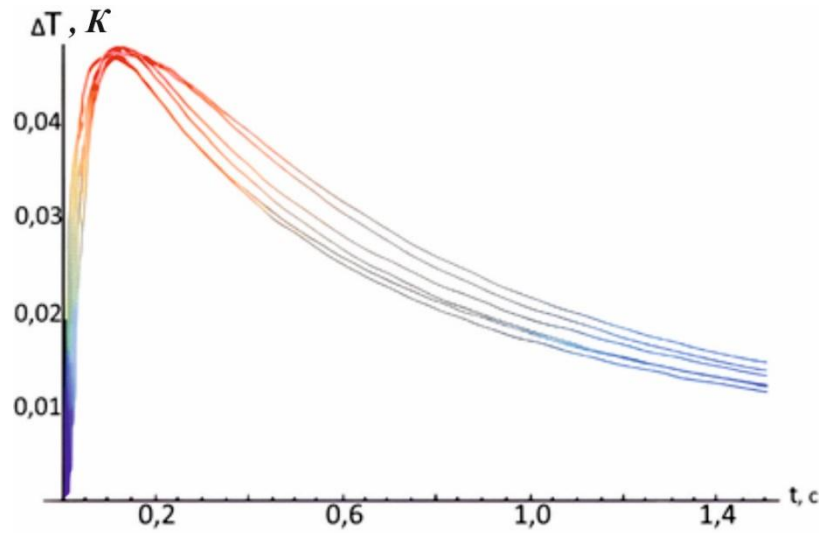


Рисунок 2.11 – Зависимости $\Delta T(t)$ для модельного образцов гранита при случайном распределении трещин
($N = 100$, $R = 0,5$ мм, $\sigma_{33} = 3$ МПа и $\Delta\sigma_{33} = 0,2$ МПа)

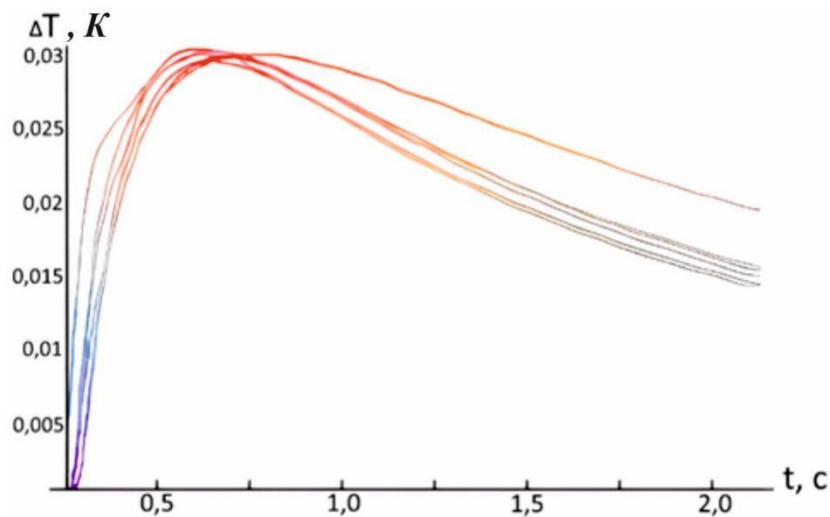


Рисунок 2.12 – Зависимости $\Delta T(t)$ для модельного образцов гранита при случайном распределении трещин
($N = 100$, $R = 0,5$ мм, $\sigma_{33} = 3$ МПа и $\Delta\sigma_{33} = 0,2$ МПа)

На Рисунках 2.13 – 2.15 представлены 3D-зависимости $\Delta T_{max}(N, R)$, полученные для различных реализаций пространственного распределения трещин по результатам расчетов, проведённых для обоих геоматериалов для значений $\sigma_{33} = 3$ МПа и $\Delta\sigma_{33} = 0,2$ МПа при различных значениях $N \in 0,30 \dots 300$ и $R \in 0,01 \dots 1$ мм.

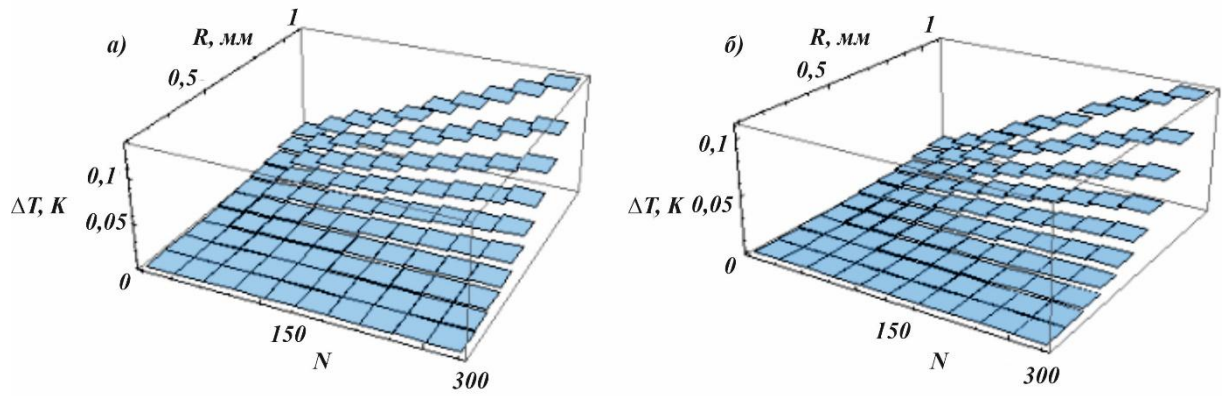


Рис. 2.13. Зависимость $\Delta T_{max}(N, R)$ для модельных образцов гранита (а) и известняка (б) при $\sigma_{33} = 3$ МПа и $\Delta\sigma_{33} = 0,2$ МПа

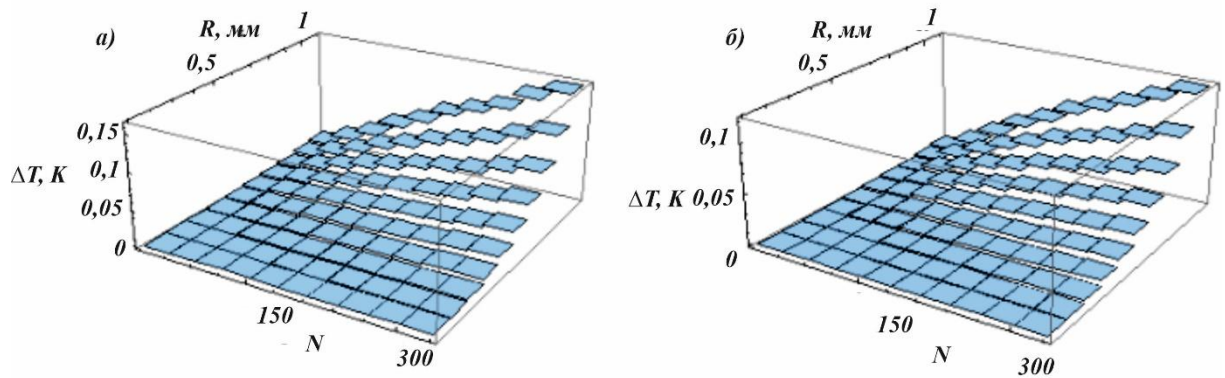


Рис. 2.14. Зависимость $\Delta T_{max}(N, R)$ для модельных образцов гранита (а) и известняка (б) при $\sigma_{33} = 3$ МПа и $\Delta\sigma_{33} = 0,2$ МПа

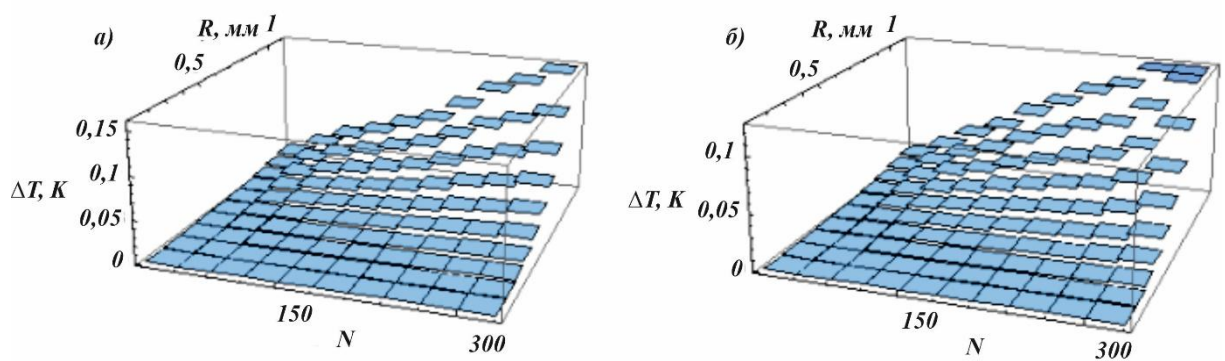


Рис. 2.15. Зависимость $\Delta T_{max}(N, R)$ для модельных образцов гранита (а) и известняка (б) при $\sigma_{33} = 3$ МПа и $\Delta\sigma_{33} = 0,2$ МПа

Полученные трёхмерные графики $\Delta T_{max}(N, R)$ как для равномерного, так и для случайного распределения трещин указывают на достаточно сложный характер зависимости ΔT_{max} от их числа и размера.

Из трехмерных графиков видно, что увеличение числа трещин в образце приводит к росту максимального значения температурного отклика при изменении напряженного состояния. Оценивая полученные зависимости, по-видимому, следует предположить, что по величине максимального изменения температуры можно судить о числе трещин в исследуемом образце и характерном их размере.

На Рисунке 2.16 представлены прямые, являющиеся аппроксимациями зависимостей, рассчитанных по формулам (2.9) и (2.10) для образцов гранита и известняка и отражающих динамику изменения приращений температуры от сжимающего напряжения σ_{33} . Расчеты для обоих образцов, которые имели форму куба с гранью $L = 0,1$ м, производились при фиксированном числе ($N = 100$) и размере ($R = 0,5$ мм) трещин. Величина σ_{33} менялась от 0 до 9 МПа. Расчет производился с шагом 0,2 МПа.

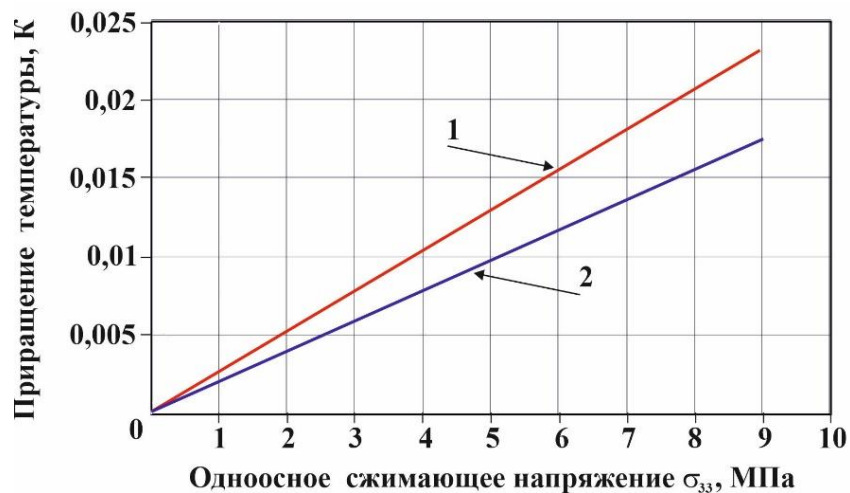


Рис. 2.16 – Изменение приращений температуры ΔT образцов гранита (1) и известняка (2) от сжимающего напряжения σ_{33}

Из полученных результатов оценочных расчетов видно, что при уровнях действующих напряжений, составляющих не более 20% от предельного, прогнозируемое приращение температуры изменяется в диапазоне $10^{-3} - 10^{-2}$ К в зависимости от концентрации и размеров трещин.

2.2 Аппаратурное обеспечение для регистрации изменений интенсивности ИК-излучения с поверхности горных пород при их деформировании

Малое значение ΔT для подвергаемых нагружению геоматериалов предопределяет сложность получения информации о $\Delta P(t)$ по измерениям $\Delta T(t)$. Кроме того, условия реальных геомеханических и геофизических экспериментов не позволяют использовать стандартные методы температурных измерений, особенно при измерениях в грунтах. Поэтому было применено бесконтактное измерение малых вариаций температуры, основанное на законе Стефана–Больцмана $w(T) = \varepsilon \sigma T^4$, где $w(T)$ – интенсивность ИК-излучения с поверхности тела от ее температуры, $\varepsilon_T < 1$ – коэффициент излучательной способности, σ – постоянная Стефана – Больцмана).

В качестве первичного приемника ИК-излучения был выбран детектор РТН–30Г [215, 216], предназначенный для бесконтактного измерения изменений интенсивности оптического излучения в инфракрасном диапазоне частот. Приемный элемент РТН–30Г представляет собой термобатарею, составленную из последовательно соединенных высокочувствительных термопар, нанесенных на плату методом вакуумного напыления. Его работа основана на преобразовании энергии потока теплового излучения, падающего на приемную площадку термоэлемента, в термо–ЭДС, пропорциональную величине потока излучения.

Термоэлемент РТН–30Г обеспечивает измерение постоянных потоков ИК-излучения сплошного спектра в спектральном диапазоне длин волн λ от 2 до 14 мкм и в диапазоне регистрируемых мощностей W от $8 \cdot 10^{-10}$ до $5,4 \cdot 10^{-3}$ Вт, а также возможность формирования массива значений изменений аналогового выходного сигнала в мВ пропорциональных значениям ΔT в соответствии с калибровочной зависимостью.

На Рисунке 2.15а представлен общий вид термоэлемента РТН–30Г, а на Рисунке 2.15б – его принципиальная схема.

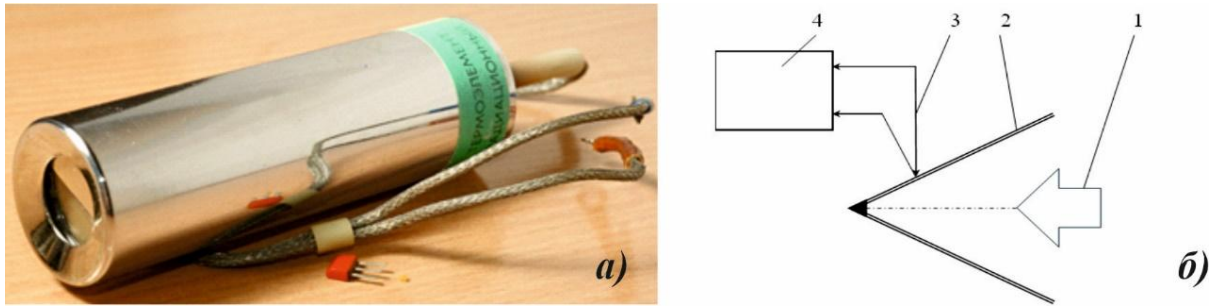


Рисунок 2.15 – Общий вид термоэлемента РТН–30Г (а)

и его принципиальная схема (б):

- 1 – направление падения излучения; 2 – приемная полость с черной эмалью на внутренней поверхности; 3 – термоэлектрическая батарея;
4 – измерительная система

В данной главе также приведена количественная оценка приращения мощности ИК–излучения ΔW , соответствующей изменению температуры излучающего тела на $\Delta T = 0,001$ К, выполненная по формуле:

$$\Delta W(T) = 4\sigma S T_0^3 \Delta T = 5,5 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}, \quad (2.11)$$

где $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ – постоянная Стефана–Больцмана; $S = 9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ – площадь приемного окна термоэлемента; температура окружающей среды $T_0 = 300$ К. Полученное значение $\Delta W(T)$ как минимум на два порядка выше значения минимальной чувствительности ($\Delta W_{\min} \approx 8 \cdot 10^{-10} \text{ Вт}$) термоэлемента РТН–30Г. Тем самым представленный расчет подтверждает возможность использования указанного чувствительного элемента для фиксации параметров термоэмиссионных процессов, сопутствующих изменению напряженного состояния геоматериалов.

Следует отметить, что формула Стефана–Больцмана (1.4) дает интегральную характеристику излучения во всем спектральном диапазоне электромагнитных волн. Однако датчик РТН–30Г имеет полосу пропускания от 2 до 14 мкм. Поэтому был произведен расчет, показывающий, какую часть общей интенсивности W составляет значение интенсивности излучения $W_{\lambda_1 \rightarrow \lambda_2}$, принадлежащей указанному диапазону. Такой расчет, проведенный по формулам Планка (1.3) и Стефана–Больцмана (1.4), показал, что на диапазон λ от 2 до 14 мкм

приходится половина от общей интенсивности излучения, что при заданной чувствительности обуславливает возможность измерения малых приращений температуры. Указанный расчет реализован на языке программирования Python и представлен в Приложении А.

Разработанный компьютеризированный многоканальный измерительный комплекс позволяет вести автоматизированную регистрацию механических, терморadiационных параметров [217, 218]. Аппаратно-программный комплекс включает в себя устройство ввода данных, соединительный кабель (обеспечивает подключение устройства к персональному компьютеру (ПК) через интерфейс USB) и соответствующее программное обеспечение. Комплекс даёт возможность фиксировать изменения регистрируемых данных во времени и отслеживать их динамику.

Общий вид измерительного комплекса представлен на Рисунке 2.16.



Рисунок 2.16 – Общий вид измерительного комплекса на базе термоэлемента РТН–30Г

Принципиальная электрическая схема измерительного комплекса на базе термоэлемента РТН–30Г представлена в Приложении А.

Устройство ввода данных выполнено в виде составного модуля, размещённого в прямоугольном корпусе из силумина [218]. В его состав входят термоэлемент РТН–30Г (служит приёмником потока инфракрасного излучения),

тензометрические элементы, ячейка ввода и первичной обработки данных, а также интерфейсная ячейка.

В составе ячейки ввода и первичной обработки данных – однокристалльная микроЭВМ AT91SAM7S256–64 [218]. Благодаря внушительному объёму памяти устройство может хранить данные и программы для их предварительной обработки. МикроЭВМ выполняет не только обработку информации, но и ряд интерфейсных задач: передаёт данные на ПК, принимает от него параметры настройки работы устройства и др.

В той же ячейке размещены три аналого–цифровых преобразователя (АЦП), которые переводят аналоговые сигналы от датчиков в цифровой формат и направляют их в микроЭВМ. Два из АЦП отвечают за фильтрацию и преобразование данных с тензодатчиков, третий – обрабатывает сигналы, поступающие с ИК–радиометра.

Специализированные аналого–цифровые преобразователи (АЦП), использованные в системе, обеспечивают ввод аналоговых данных с 24–битным разрешением. Это позволяет достичь разрешающей способности на уровне примерно 0,134 мкВ при отношении сигнал/шум около 120 дБ.

В конструкцию АЦП интегрированы фильтры для подавления промышленных помех – они эффективно устраняют наводки на частотах 50, 60, 100 и 120 Гц. Благодаря этому минимизируется влияние помех от электросети, а также наводок, создаваемых выпрямителями в цепях питания оборудования.

Такое техническое решение гарантирует требуемую точность измерений при работе с ИК–радиометром и тензометрами. Это особенно важно, учитывая, что выходные напряжения тензометров составляют не более нескольких десятков милливольт, а сигналы с ИК–радиометра – всего лишь единицы микровольт.

Интерфейсная ячейка оснащена специализированными интегральными схемами и разъёмами – они предназначены для подключения USB–интерфейса и тензометров. Конструктивно ячейка размещена над модулем ввода и обработки данных: соединение реализовано через разъёмные соединители по схеме мезонинной конструкции. Информацию о типе подключения указана на корпусе

устройства ввода данных (со стороны разъёмов).

Разработанное специально для этой системы программное обеспечение обеспечивает приём данных с устройства ввода на ПК, а также их запись и визуализацию – в виде графиков [218]. На Рисунке 2.17 приведены экранное окно программы для регистрации и визуализации измеряемых данных с тензодатчиков и ИК–радиометра.

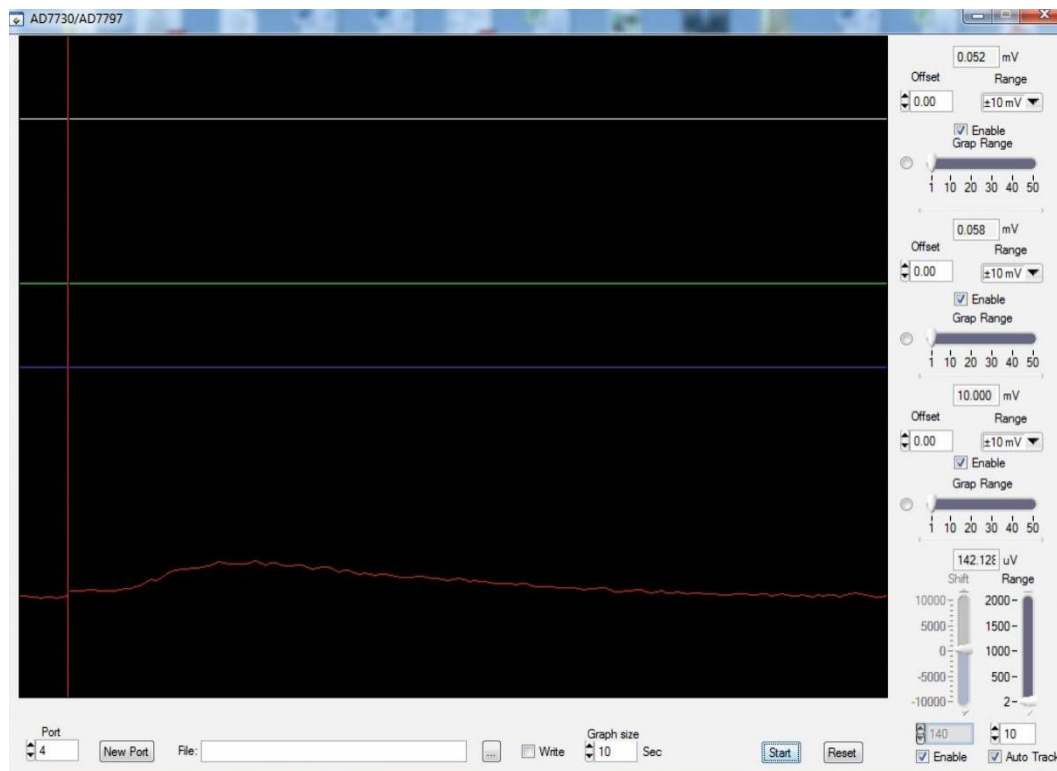
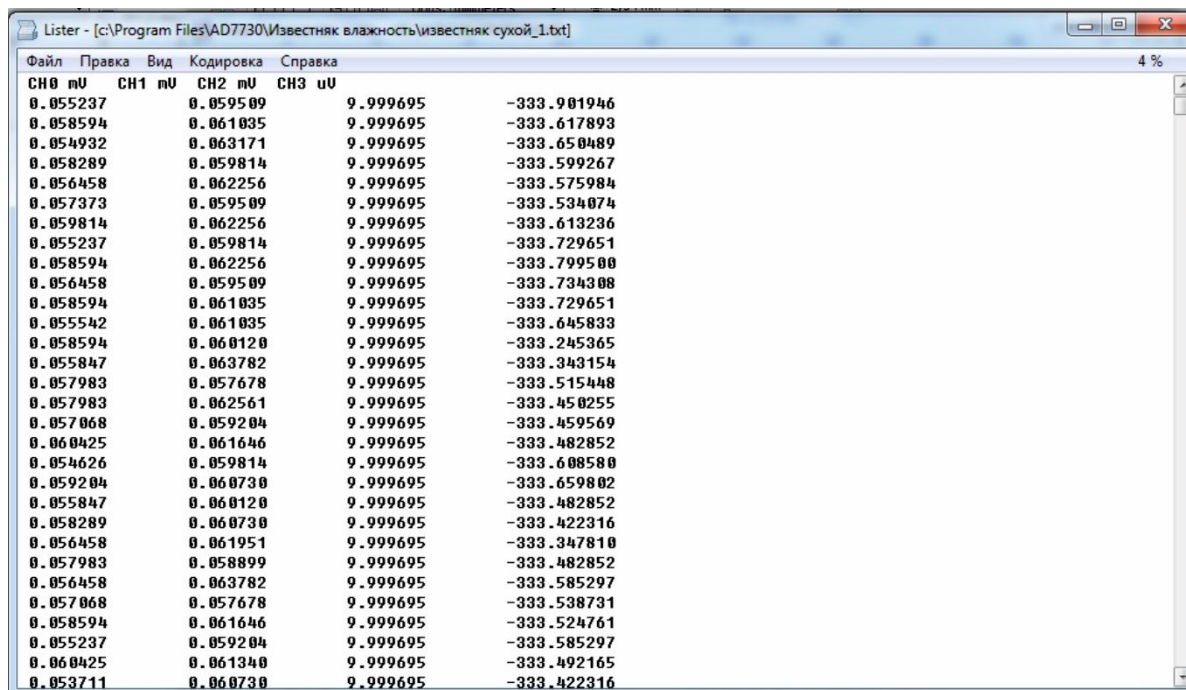


Рисунок 2.17 – Экранная форма программы для регистрации и визуализации измеряемых данных с тензодатчиков и ИК–радиометра

На графиках по горизонтальной оси (абсцисс) отображается время проведения измерений, а по вертикальной (ординат) – текущие значения измеряемых величин, масштабированные для удобного отображения (Рисунок 2.17). Интерфейс программы – интерактивный: пользователь может настраивать параметры визуализации, активировать или отключать сохранение данных на диск, а также контролировать процесс сбора информации в режиме реального времени.

Данные записываются в текстовый файл одновременно с проведением измерений и их визуализацией на экране в виде графиков [218]. Структура файла

включает строку заголовка и последующие строки с измеренными значениями. В заголовке указаны все каналы измерений вместе с соответствующими единицами измерения. Пример фрагмента текстового файла, записанного в ходе испытаний образца горной породы представлен на Рисунке 2.18.



CH0 mV	CH1 mV	CH2 mV	CH3 uV
0.055237	0.059509	0.059509	-333.981946
0.058594	0.061835	0.061835	-333.617893
0.054932	0.063171	0.063171	-333.650489
0.058289	0.059814	0.059814	-333.599267
0.056458	0.062256	0.062256	-333.575984
0.057373	0.059509	0.059509	-333.534074
0.059814	0.062256	0.062256	-333.613236
0.055237	0.059814	0.059814	-333.729651
0.058594	0.062256	0.062256	-333.799500
0.056458	0.059509	0.059509	-333.734308
0.058594	0.061835	0.061835	-333.729651
0.055542	0.061835	0.061835	-333.645833
0.058594	0.060120	0.060120	-333.245365
0.055847	0.063782	0.063782	-333.343154
0.057983	0.057678	0.057678	-333.515448
0.057983	0.062561	0.062561	-333.450255
0.057068	0.059204	0.059204	-333.459569
0.060425	0.061646	0.061646	-333.482852
0.054626	0.059814	0.059814	-333.608580
0.059204	0.060730	0.060730	-333.659802
0.055847	0.060120	0.060120	-333.482852
0.058289	0.060730	0.060730	-333.422316
0.056458	0.061951	0.061951	-333.347810
0.057983	0.058899	0.058899	-333.482852
0.056458	0.063782	0.063782	-333.585297
0.057068	0.057678	0.057678	-333.538731
0.058594	0.061646	0.061646	-333.524761
0.055237	0.059204	0.059204	-333.585297
0.060425	0.061340	0.061340	-333.492165
0.053711	0.060730	0.060730	-333.422316

Рисунок 2.17 – Пример фрагмента текстового файла, записанного в ходе испытаний образца горной породы

Ниже заголовка размещаются данные, поступающие с четырёх каналов: первые три передают показания тензометров (в милливольтках), четвёртый – данные ИК–радиометра (в микровольтах). Каждый отсчёт (результат одного измерения) представлен в отдельной строке, где значения каналов разделены символами табуляции. Таким образом, одна строка соответствует одному измерению. Частота дискретизации остаётся неизменной и составляет 16,6 Гц, что соответствует интервалу между измерениями в 60 мс.

Выводы по Главе 2

1) В рамках модели изотропной среды с хаотически ориентированными трещинами получены зависимости $\Delta T(t)$ и $\Delta T_{max}(N, R)$ для модельных образцов гранита и известняка при равномерном и случайном распределении трещин.

2) Зависимости $\Delta T(t)$ для модельных образцов гранита и известняка, как в случае равномерного, так и в случае случайного распределения трещин по объему образцов, имеют характерный максимум, который достигается на временах 0,2 – 0,5 с, что позволяет фиксировать значения ΔT_{max} экспериментально.

3) Полученные трёхмерные графики $\Delta T_{max}(N, R)$ как для равномерного, так и для случайного распределения указывают на достаточно сложный характер зависимости ΔT_{max} от числа и размера трещин.

4) Результаты расчетов, проведенных как для равномерного, так и для случайного распределения трещин показывают, что значения ΔT_{max} , соответствующие указанным величинам нагрузки лежат в диапазоне 0,019 – 0,043 К. Результаты расчетов ΔT , произведенных для тех же геоматериалов по формуле Кельвина при аналогичных значениях $\Delta \sigma_{33}$, принадлежат диапазону величин 0,0002 – 0,001 К, что как минимум на порядок ниже значений оценки, проведенной в рамках предложенной модели.

4) Из полученных результатов оценочных расчетов видно, что при уровнях действующих напряжений, составляющих не более 20% от предельного, прогнозируемое приращение температуры изменяется в диапазоне $10^{-3} - 10^{-2}$ К в зависимости от концентрации и размеров трещин. что позволило сформулировать **первое научное положение:**

«Теоретическими расчетами получено, что в изотропной среде с хаотически ориентированными трещинами приращения температур при изменении ее напряженно-деформированного состояния в диапазоне до 20% от разрушающих нагрузок имеют порядок 10^{-2} К».

5) Проведена количественная оценка приращения мощности ИК-излучения ΔW , соответствующей изменению температуры излучающего тела на $\Delta T = 0,001$ К.

Полученное значение $\Delta W(T)$ практически на два порядка выше значения минимальной чувствительности ($\Delta W_{min} \approx 8 \cdot 10^{-10}$ Вт) термоэлемента РТН–30Г. Тем самым представленный расчет подтверждает возможность использования указанного чувствительного элемента для фиксации параметров термоэмиссионных процессов, сопутствующих изменению напряженного состояния геоматериалов, что позволило сформулировать **второе научное положение:**

«Установлено, что достоверные оценки изменений интенсивности ИК–излучения с поверхности геоматериалов, определяемые по значениям приращений их температуры (с точностью до 10^{-3} К) при деформировании в адиабатических условиях, могут быть получены по данным бесконтактной терморადиометрии в диапазоне длин волн от 2 до 14 мкм, что создает предпосылки для использования терморადиометрии в качестве инструмента геоконтроля».

б) Разработан компьютеризированный многоканальный измерительный комплекс, который позволяет вести автоматизированную синхронную регистрацию деформационно–прочностных и термоэмиссионных параметров.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИК–ИЗЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ГЕОМАТЕРИАЛОВ ПРИ МОНОТОННОМ ИЗМЕНЕНИИ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ

3.1 Методика и стенды для проведения экспериментальных исследований

Для экспериментального обоснования возможности использования терморadiометрических измерений для диагностики процессов деформирования горных пород были проведены серии испытаний по одноосному сжатию образцов различных типов геоматериалов на лабораторных стендах, включающих в себя как устройство нагружения, так и многоканальную систему измерения, преобразования и автоматической передачи регистрируемых данных в компьютер.

Базовый вариант экспериментального стенда (принципиальная схема которого представлена на Рисунке 3.1) позволяет реализовывать различные схемы нагружений и синхронно регистрировать отклики геоматериалов на эти воздействия как на основе ИК–измерений, так и с помощью стандартных тензометрических измерений [219, 220].

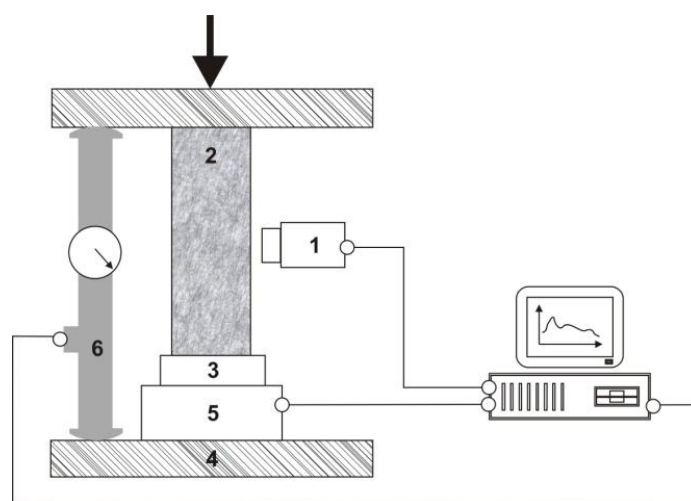


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема базового варианта экспериментального стенда: 1 – ИК-радиометр; 2 – образец геоматериала; 3 – металлическая пластинка; 4 – плита пресса; 5 – тензометр; 6 – индикатор продольной деформации

В качестве первичного приемника потока инфракрасного излучения в описываемых измерениях использовался промышленно выпускаемый детектор РТН –30Г. Также при разработке экспериментального стенда учтена возможность его модернизации, посредством включения в его состав измерительного комплекса А– Line 32DB, позволяющего осуществлять акустоэмиссионные измерения.

ИК–радиометр (1) устанавливается примерно в середине высоты образца (2) на расстоянии 0,3...0,8 см от его поверхности. Между пластинкой (3), на которую опирается образец, и плитой (4) устанавливается тензометрический элемент (5) для измерения изменений приложенного к образцу усилия. В состав измерительной установки также включен индикатор продольной деформации (6), находящийся между плитой (4) и подвижной траверсой пресса.

Для тестирования измерительных средств и методических положений разрабатываемого метода ИК–радиометрии на описанном выше испытательном стенде были проведены эксперименты на образцах бетона [219, 220]. Образцы имели форму цилиндров диаметром 52 мм и высотой 100 мм. Сжатие образцов осуществлялось с заданным шагом возрастания нагрузки ($d\sigma/dt = const$).

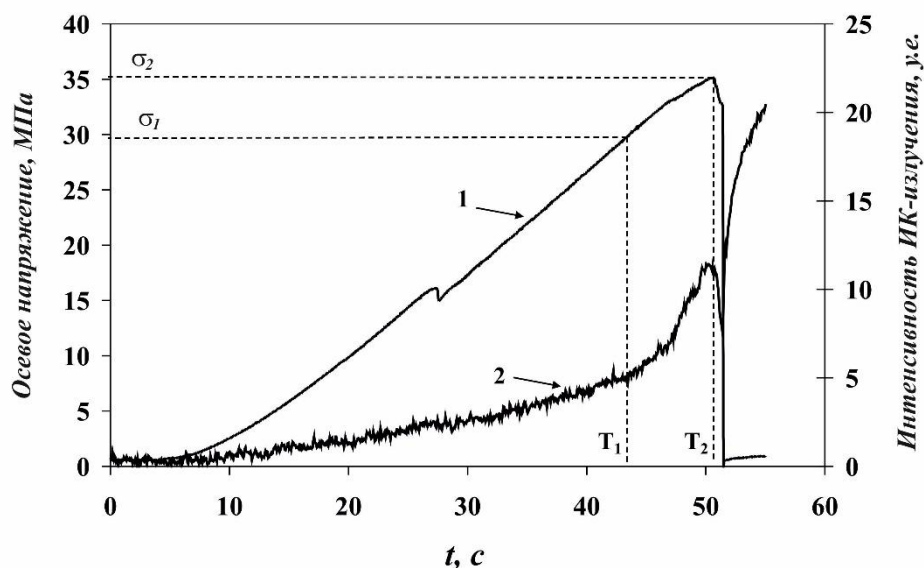


Рисунок 3.2 – Зависимости изменения осевого напряжения $\sigma(t)$ (1) и интенсивности ИК–излучения $V_w(t)$ (2) от времени при испытаниях образца бетона при $d\sigma/dt = const = 0,7$ МПа/с

На Рисунке 3.2 для одного из испытывавшихся образцов бетона

представлены зависимости изменения осевого напряжения $\sigma(t)$ (1) и интенсивности ИК–излучения $V_w(t)$ (2) от времени.

Анализ полученных записей сигналов $\sigma(t)$ и $V_w(t)$ позволяет выявить некоторые особенности деформирования исследуемого образца. Так, при монотонном возрастании нагрузки σ в четко фиксируемой по виду графика ИК–сигнала $V_w(t)$ точке $T_1 \approx 44$ с (Рисунок 3.2, зависимость 2) происходит прогнозируемое в [165] резкое возрастание значений интенсивности ИК–излучения V_w по сравнению с областью линейной термоупругости.

При возрастании уровня нагрузки σ , когда деформации материала образца выходят за пределы упругости, внутри него начинают развиваться нелинейные диссипативные процессы, в условиях которых возрастание температуры и, соответственно, приращения интенсивности ИК–излучения оказывается более значимыми, чем при упругом режиме. Понятно, что момент времени T_1 , соответствующий изменению наклона графика $V_w(t)$ (Рисунок 3.2, зависимость 2), соответствует пределу упругости образца σ_e . Указанный нелинейный участок зависимости $V_w(t)$, соответствующий деформациям образца за пределом упругости, заканчивается в момент $T_2 \approx 51$ с резким падением значений интенсивности теплового излучения V_w (Рисунок 3.2, зависимость 2), которое, соответствует разуплотнению образца при его дезинтеграции. Сопоставляя графики изменений нагрузки $\sigma(t)$ и интенсивности инфракрасного излучения $V_w(t)$, можно сделать вывод, что момент времени T_2 , в который наступает указанный выше «обрыв» графика ИК–сигнала $V_w(t)$, соответствует пределу прочности образца σ_c .

Полученные в описанном эксперименте результаты принципиально подтверждают высказанные ранее предположения о возможности оценки по данным ИК–радиометрии механического состояния горных пород не только на линейной (упругой), но и на нелинейной (упругопластической) стадии их деформирования.

Тем не менее, для более надежного количественного оценивания изменений деформационно–прочностных параметров геоматериалов несомненно требуется

сопоставление данных, полученных методом ИК–радиометрии с данными стандартных механических испытаний, подразумевающих построение зависимостей компонентов первого инварианта напряжений от соответствующих компонентов деформаций и последующим определением по ним указанных механических характеристик. Однако стандартные методы измерения изменений параметров напряженно–деформированного состояния (НДС) массивов горных пород и строительных конструкций подразумевают использование различных модификаций деформометров, которые размещаются либо на свободных поверхностях обследуемых объектов, либо в их теле [53, 55, 221].

Однако в отличие от образцов геоматериалов, испытываемых в лабораторных условиях, размещение тензодатчиков на поверхности локального участка породного массива может быть затруднительно, а расположение их в теле элементов конструкций требует проведения нарушающих их целостность специальных работ, что может быть труднореализуемо. Поэтому представляется целесообразным проводить дальнейшие эксперименты, направленные на обоснование возможностей эффективного использования метода ИК–радиометрии, в комплексе не только со стандартными измерениями механических параметров, но и с измерениями, основанными на иных (по сравнению с термоэмиссионными) принципах.

Как видно из проведенного в Главе 1 обзора литературных источников, для диагностики различных стадий процессов деформирования геоматериалов одним из наиболее распространенных подходов является использование акустоэмиссионных измерений [109], по параметрам которых возможно следить за накоплением числа трещин, а также оценивать их размеры [121].

С другой стороны, в Главе 2 было продемонстрировано, что концентрация и размер трещин в образце геоматериала в значительной степени определяют также и динамику вариаций интенсивности ИК–излучения, сопровождающего изменение его напряженного состояния. Поскольку при приближении к стадии разрушения деформирование геоматериалов сопровождается процессами активного трещинообразования, а именно эти процессы в твердых телах являются основным

источником интенсификации тепловыделения, то эффективность ИК–диагностики изменений механического состояния геоматериалов может быть повышена за счет комплексирования с данными синхронных измерений параметров АЭ. Поэтому усовершенствованный вариант испытательного стенда включал аппаратные решения, позволяющие наряду с измерением деформационно–прочностных и ИК – радиометрических параметров испытываемых образцов геоматериалов одновременно регистрировать и АЭ–сигналы при различных схемах и режимах нагружения.

На Рисунке 3.3а представлен общий вид экспериментального стенда, а на Рисунке 3.3б его принципиальная схема.

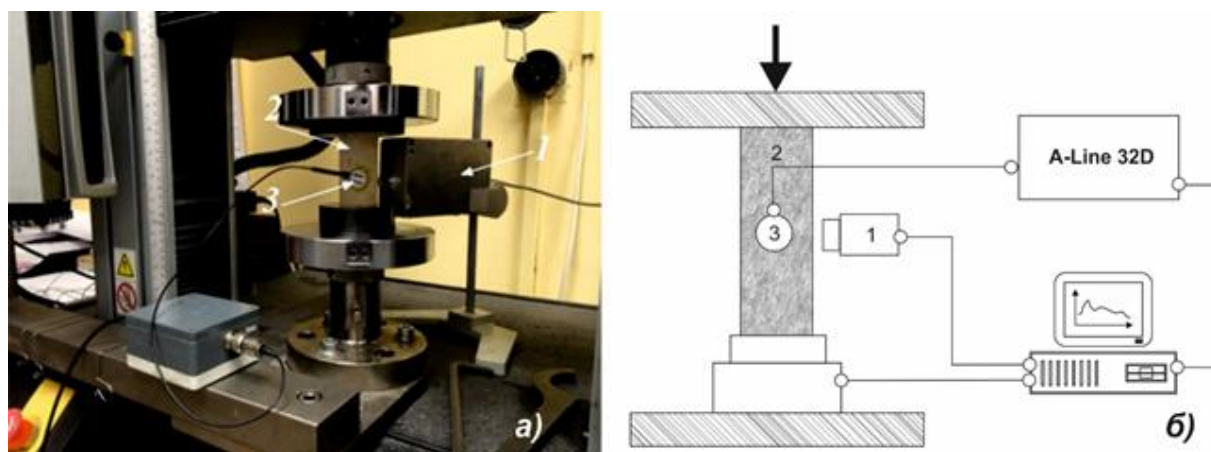


Рисунок 3.3 – Общий вид экспериментального стенда (а) и его принципиальная схема (б): 1 – ИК–радиометр; 2 – образец горной породы; 3 – преобразователь акустической эмиссии

ИК–радиометр (1), также, как и при описанных выше экспериментах, располагался примерно в середине высоты образца (2) на расстоянии 0,3...0,8 см от его поверхности. Регистрация скорости счета АЭ $\dot{N}$ велась пьезопреобразователем (3) посредством измерительного комплекса А–Line 32D в полосе частот от 30 до 500 кГц. Преобразователь акустической эмиссии размещается на свободной поверхности образца на одной высоте с датчиком ИК–излучения. Кроме того, в процессе нагружения регистрировались изменения нагрузки и продольной деформации.

Один из методических вопросов, решавшихся в ходе описываемых экспериментов, – выявление диапазонов скоростей нагружения, при которых удастся достаточно четко идентифицировать процессы деформирования и их различные стадии по изменениям регистрируемых физических параметров. Диапазоны скоростей изменения напряжений для различных геоматериалов, при которых АЭ – измерения являются эффективными, указываются в ряде публикаций, например, [109, 118, 134]. Для ИК–измерений соответствующие оценки основываются на необходимости соблюдения условий «квазиadiaбатического» деформирования при проведении измерений [222].

При проведении описываемых экспериментов в режиме с постоянной скоростью нагружения образцов $d\sigma/dt = \text{const}$ величины $d\sigma/dt$ в отдельных опытах принимались равными от 0,05 МПа/с до 1 МПа/с. В опытах, в которых $d\varepsilon/dt = \text{const}$ значения скоростей изменения продольной деформации $d\varepsilon/dt$ варьировались в пределах от 0,005 до 0,02 мм/с.

3.2. Исследования особенностей проявлений термоэмиссионных эффектов в «пластичных» геоматериалах при их одноосном сжатии (на примере образцов каменной соли)

Испытания проводились на цилиндрических образцах (диаметром 36...38 мм и высотой 66...72 мм) каменной соли, которая может быть отнесена к категории пластичных горных пород [223].

Выбор каменной соли в качестве первоначального объекта исследований обусловлен, во – первых, ее высокой, по сравнению с исследовавшимися ранее хрупкими геоматериалами (мрамор, известняк, бетоны и др.), термоактивностью [219, 220, 224], т.е. более высоким уровнем изменений интенсивности ИК–излучения, соответствующих одним и тем же вариациям напряжений. Во–вторых, в отличие от указанных типов горных пород, склонных к хрупкому разрушению, образцы каменной соли в условиях одноосного сжатия характеризуются

достаточно большой разницей значений предела упругости σ_e и предела прочности σ_c [223, 225], что позволяет более детально исследовать особенности термомеханических эффектов, сопутствующих процессам неупругого деформирования в диапазоне напряжений $\sigma_e < \sigma < \sigma_c$.

Одноосное сжатие осуществлялось в двух различных режимах: при постоянной скорости нагружения ($d\sigma/dt = \text{const}$) (образцы первой группы) и при постоянной скорости изменения продольной деформации ($d\varepsilon/dt = \text{const}$) (образцы второй группы). Одноосное сжатие осуществлялось на испытательной машине Instron 150LX.

3.2.1. Результаты экспериментов по одноосному испытанию образцов каменной соли в режиме с постоянной скоростью нагружения

На Рисунке 3.4 представлены графики изменения во времени осевого напряжения $\sigma(t)$ (1), интенсивности ИК-излучения $V_w(t)$ (2) и скорости счета АЭ $\dot{N}(t)$ (3) при деформировании образца каменной соли с постоянной скоростью возрастания нагрузки $d\sigma/dt = \text{const} = 0,35 \text{ МПа/с}$ [226 – 228].

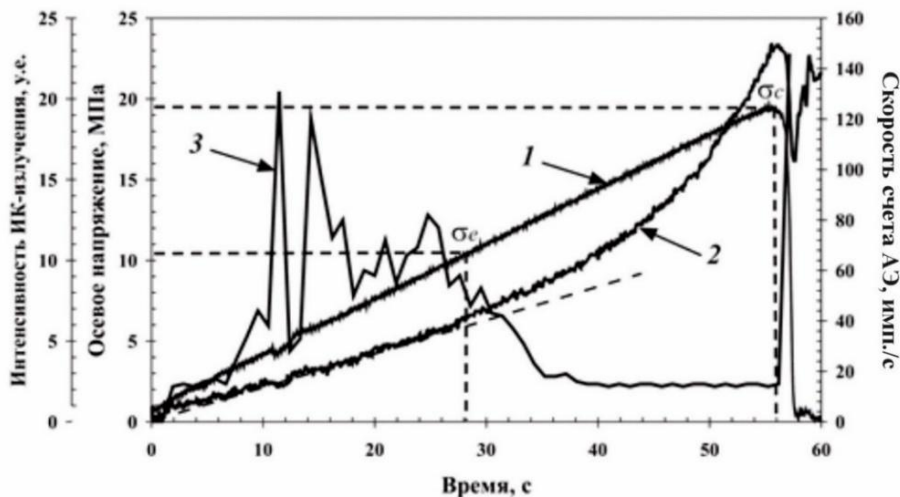


Рисунок 3.4 – Зависимости осевого напряжения $\sigma(t)$ (1), интенсивности ИК-излучения $V_w(t)$ (2) и скорости счета АЭ $\dot{N}(t)$ (3) от времени при $d\sigma/dt = \text{const} = 0,35 \text{ МПа/с}$

На Рисунке 3.5 приведена соответствующая зависимость осевого напряжения от относительной продольной деформации (диаграмма « σ – ε »), полученная в ходе описываемого эксперимента [226 – 228].



Рисунок 3.5 – Зависимость осевого напряжения от относительной продольной деформации при $d\sigma/dt = \text{const} = 0,35$ МПа/с

Анализируя зависимость $V_w(t)$ (Рисунок 3.4, зависимость 2), можно сделать вывод, что ее возрастание приобретает нелинейный характер в достаточно явно фиксируемой точке, соответствующей значению осевого напряжения $\sigma \approx 10$ МПа (Рисунок 3.4, зависимость 1). Указанное значение σ оказывается практически совпадающим со значением предела упругости σ_e материала образца, определяемого по экспериментальной зависимости « σ – ε » (Рисунок 3.5) путем выделения в ней линейной части. Подчеркнем, что анализируемая траектория нагружения аналогична диаграмме « σ – ε », приводимой в качестве «типовой» в известных монографиях по испытаниям горных пород [225, 229].

Предел прочности образца σ_c фиксируется еще более четко по точке, в которой графики достигают максимумов и перестает выполняться режим $d\sigma/dt = \text{const}$. Аналогичные результаты получены при испытаниях образцов при различных $d\sigma/dt$, принимавшихся в диапазоне от 0,3 МПа/с до 0,5 МПа/с

[226 – 228]. Следовательно, в указанном диапазоне $d\sigma/dt$ с помощью терморadiометрических измерений момент начала неупругого деформирования каменной соли идентифицируется вполне достоверно.

Результаты акустоэмиссионных измерений (зависимость 3 на Рисунке 3.4) при таких условиях эксперимента оказались менее информативными, т.е. не позволяют четко зафиксировать моменты перехода между стадиями деформирования испытываемого образца. В то же время при «малых» скоростях $d\sigma/dt \leq 0,3$ МПа/с полученные зависимости скорости счета АЭ от времени (Рисунок 3.6) позволяют осуществлять «привязку» участков с различным поведением значений $\dot{N}(t)$ к различным стадиям деформирования образца [226, 227].

На Рисунках 3.6 и 3.7 для одного из опытов представлены полученная зависимость $\dot{N}(t)$ и соответствующая диаграмма « $\sigma - \varepsilon$ » при $d\sigma/dt = \text{const} = 0,2$ МПа/с [226, 227].

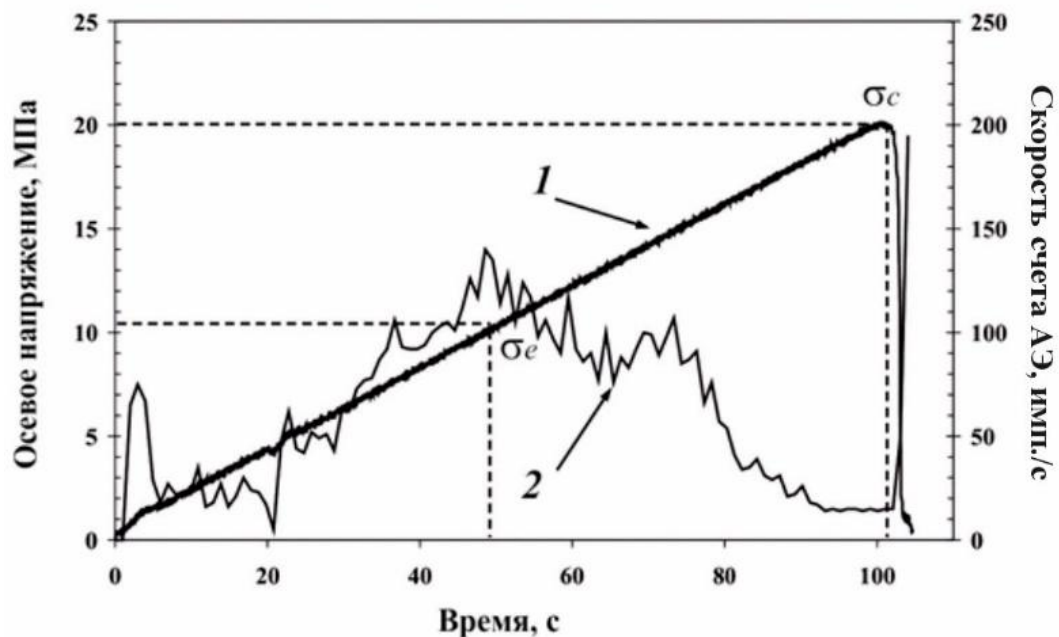


Рисунок 3.6. – Зависимости осевого напряжения $\sigma(t)$ (1) и скорости счета АЭ $\dot{N}(t)$ (2) от времени при $d\sigma/dt = 0,2$ МПа/с

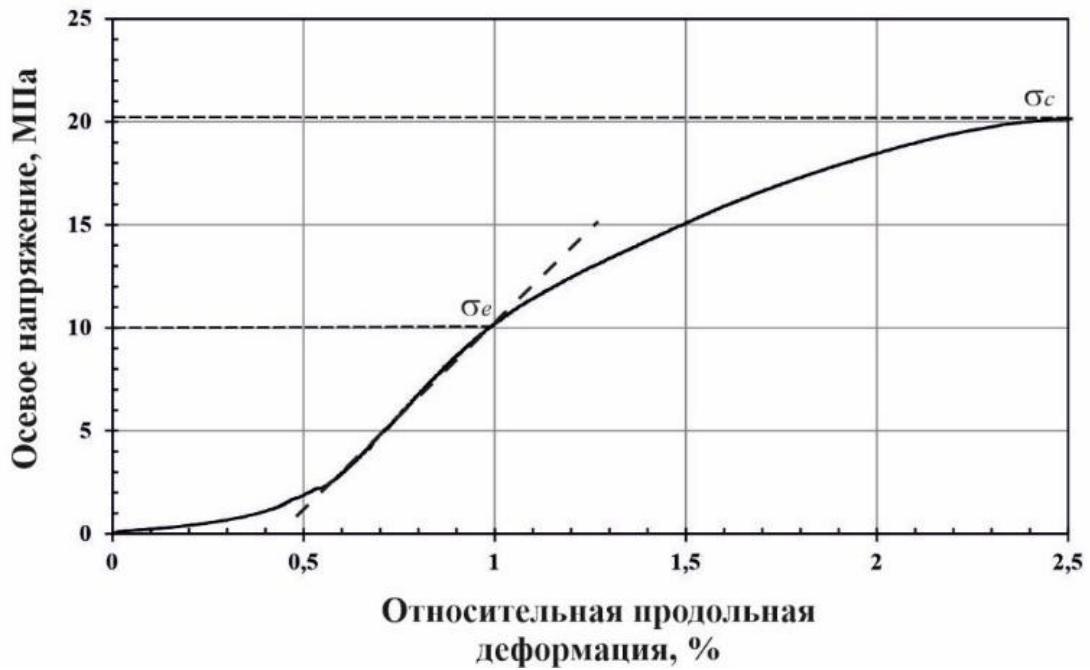


Рисунок 3.7 – Зависимость осевого напряжения от относительной продольной деформации при $d\sigma/dt=0,2$ МПа/с

Рассмотрим зависимость $\dot{N}(t)$ (зависимость 2, Рисунок 3.6) при монотонном возрастании нагрузки во времени, показанном на том же рисунке (зависимость 1, Рисунок 3.6). После характерного всплеска скорости счета АЭ при начальных нагрузках («пригрузке») значения $\dot{N}(t)$ остаются незначительными до момента времени, когда напряжения σ в образце становятся более $(0,4...0,6) \cdot \sigma_c$. Далее начинается второй участок возрастания скорости счета АЭ, в пределах которого $\dot{N}(t)$ достигает максимальных значений в конце зоны линейно–упругого деформирования (Рисунки 3.6 и 3.7). Следующее за этим участком постепенное убывание значений $\dot{N}(t)$ заканчивается кратковременным «затишьем», которое предшествует «ураганному» росту скорости счета АЭ после достижения осевым напряжением в образце предела прочности σ_c .

Диагностика процессов упругого деформирования образцов каменной соли по изменениям сопутствующего теплового излучения при скоростях нагружения $d\sigma/dt \leq 0,3$ МПа/с малоинформативна (Рисунок 3.8.), поскольку при таких скоростях нагружения требование адиабатичности процесса уже не выполняется.

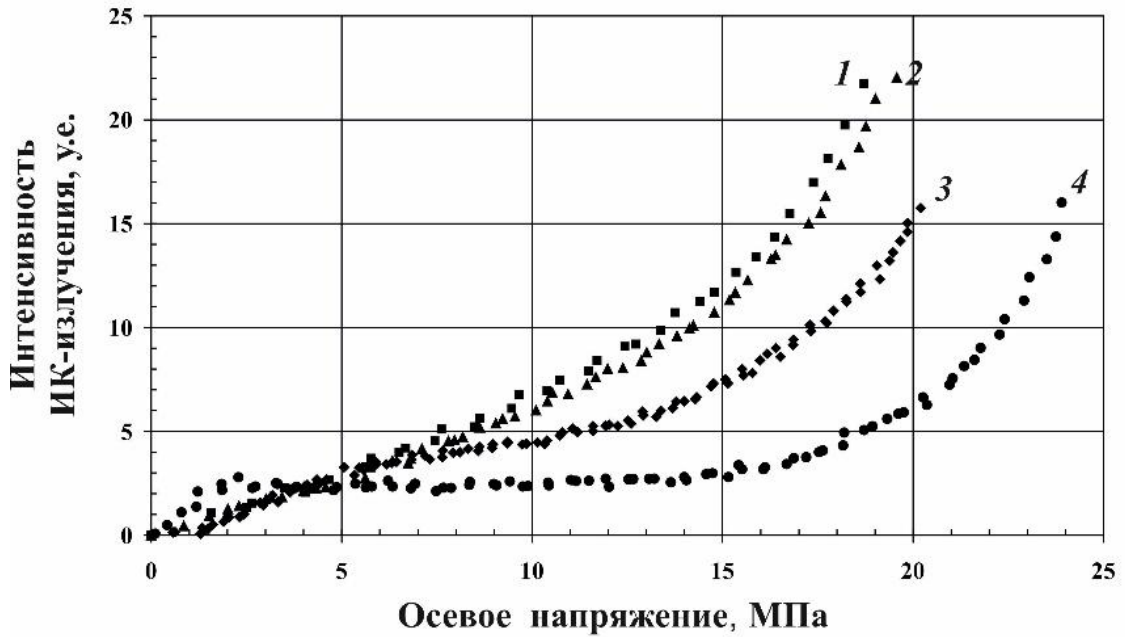


Рисунок 3.8. – Зависимости интенсивности ИК–излучения V_w от осевого напряжения σ при различных скоростях нагружения: 1 – $d\sigma/dt = \text{const} = 0,5$ МПа/с; 2 – $d\sigma/dt = \text{const} = 0,35$ МПа/с; 3 – $d\sigma/dt = \text{const} = 0,2$ МПа/с; 4 – $d\sigma/dt = \text{const} = 0,1$ МПа/с

Так, на Рисунке 3.8 на графиках зависимостей интенсивности ИК–излучения от нагрузки, полученных при испытаниях со скоростями нагружения 0,2 МПа/с и 0,1 МПа/с [228], появляется «горизонтальный» участок в зоне упругих деформаций, соответствующий интервалу нагрузки, при котором теплообмен с окружающей средой «зашумляет» изменения температуры образца за счет термомеханических процессов.

В таких условиях эксперимента по данным терморadiационных измерений не удастся достаточно четко зафиксировать точку перехода σ_e образца в зону неупругих деформаций. Оценка значения σ_e может быть получена при таких значениях $d\sigma/dt$ по результатам соответствующих акустоэмиссионных и (или) тензометрических измерений.

Таким образом, результаты исследования зависимостей вариаций термоэмиссионных и акустоэмиссионных параметров, регистрируемых при монотонном нагружении образцов геоматериалов, продемонстрировали

диаметрально противоположные характеры реакции указанных физических параметров на скорость приложения нагрузки.

Так эффективность терморадиометрических измерений, как с точки зрения идентификации процессов упругого деформирования, так и с точки зрения фиксации границ между стадиями процессов изменения напряженного состояния, повышается при увеличении скорости нагружения. С другой стороны, показано, что, в отличие от снижения эффективности терморадиометрических измерений при «медленном» ($d\sigma/dt \leq 0,3$ МПа/с) нагружении, имеет место повышение эффективности акустоэмиссионных измерений, в частности, при фиксации граничных точек между стадиями деформирования. Данный факт указывает на необходимость комплексирования результатов ИК– и акустоэмиссионных измерений для повышения надежности оценки изменений напряженно–деформированного состояния геоматериалов.

3.2.2. Результаты экспериментов по одноосному испытанию образцов каменной соли в режиме с постоянной скоростью продольной деформации

Вторая группа образцов испытывалась в условиях одноосного сжатия при постоянной скорости продольной деформации $d\varepsilon/dt = \text{const}$ [226 – 228]. При этих испытаниях зависимости изменения от времени или от нагрузки параметров эмиссионных проявлений имеют несколько иной характер по сравнению с соответствующими зависимостями, полученными при $d\sigma/dt = \text{const}$.

На Рисунке 3.9 приведены графики изменения осевого напряжения $\sigma(t)$ (1), интенсивности ИК–излучения $V_w(t)$ (2) и скорости счета АЭ $\dot{N}(t)$ (3) при скорости деформирования $d\varepsilon/dt = \text{const} = 0,01$ мм/с [226, 227].

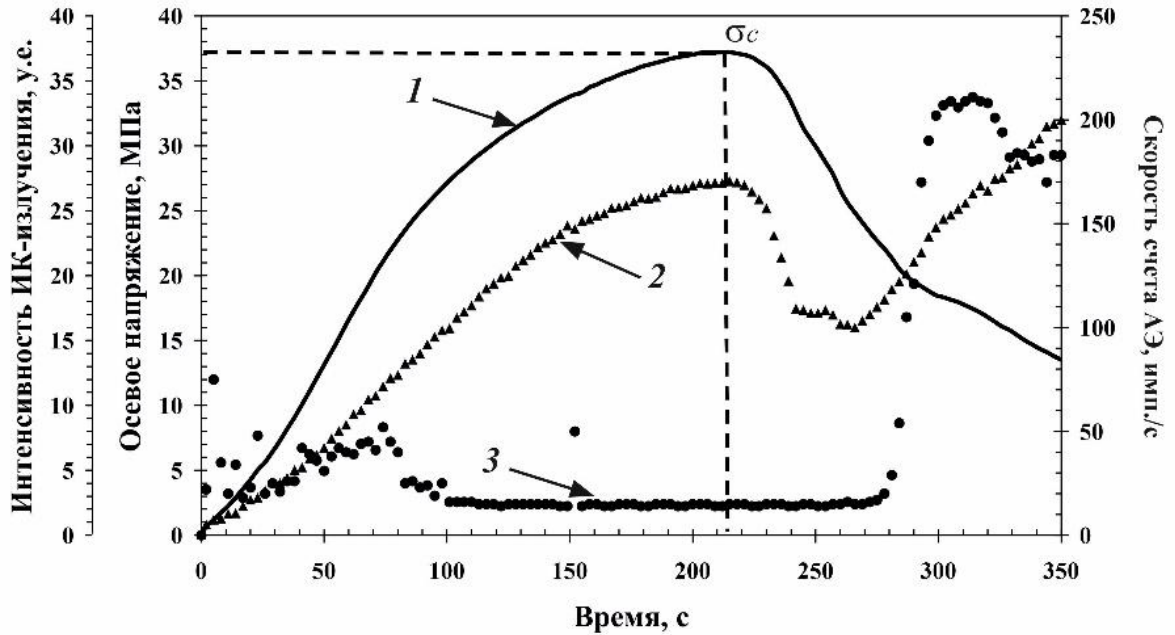


Рисунок 3.9 – Зависимости осевого напряжения $\sigma(t)$ (1), интенсивности ИК–излучения $V_w(t)$ (2) и скорости счета АЭ $\dot{N}(t)$ (3) от времени при $d\varepsilon/dt = \text{const} = 0,01$ мм/с

При таких условиях нагружения график $V_w(t)$ «подобен» зависимости $\sigma(t)$ на протяжении всей стадии «допредельного» деформирования, а не только при $\sigma(t) < \sigma_e$. Предел прочности σ_c материала испытываемого образца достоверно фиксируется по характерным и совпадающим во времени точкам перегиба графиков $\sigma(t)$ и $V_w(t)$. Кроме того, зависимости $\sigma(t)$, $V_w(t)$ и $\dot{N}(t)$ прослеживаются и на «запредельной» стадии.

Для надежной фиксации предела упругости σ_e при испытаниях в режиме при $d\varepsilon/dt = \text{const}$ следует рассмотреть поведение интенсивности ИК–излучения и скорости счета АЭ $\dot{N}$ в зависимости от осевого напряжения σ . Графики зависимостей $V_w(\sigma)$ и $\dot{N}(\sigma)$ в области допредельного деформирования представлены на Рисунке 3.10, а соответствующая диаграмма « σ - ε » – на Рисунке 3.11.

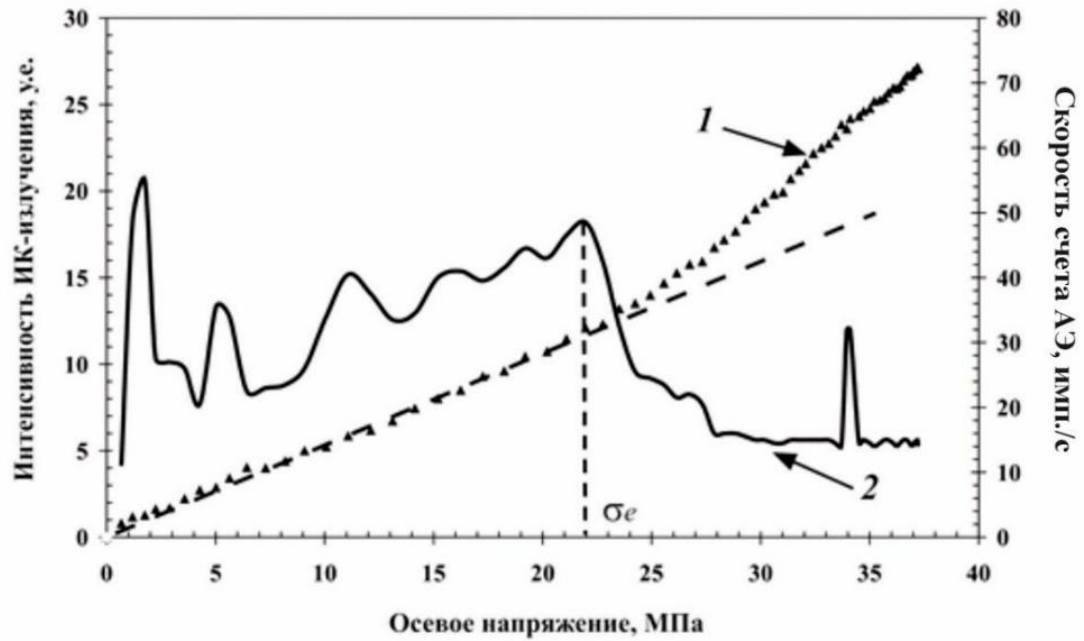


Рисунок 3.10 – Зависимости интенсивности ИК-излучения V_w (1) и скорости счета АЭ $\dot{N}$ (2) (а) от осевого напряжения σ при $d\varepsilon/dt = \text{const} = 0,01$ мм/с



Рисунок 3.11. Зависимость осевого напряжения σ от относительной продольной деформации при $d\varepsilon/dt = \text{const} = 0,01$ мм/с

При таком рассмотрении зависимости $V_w(\sigma)$ имеют вид аналогичный зависимостям $V_w(\sigma)$, полученным в режиме испытаний при $d\sigma/dt = \text{const}$, для которых также выполняется условие «квазиadiaбатичности» (зависимости 1 и 2 на

Рисунке 3.8). Следовательно, точку «перегиба» на графике $V_w(\sigma)$ при $\sigma \approx 22$ МПа можно принять за предел упругости данного образца, что подтверждается анализом графика $\dot{N}(\sigma)$ (зависимость 2 на Рисунке 3.10) и диаграммы « $\sigma - \varepsilon$ » на Рисунке 3.11.

При уменьшении значений $d\varepsilon/dt = \text{const}$, как и в случае уменьшения $d\sigma/dt$, наблюдается нарушение условий «квазиабатичности», проявляющееся в возникновении характерного «горизонтального» участка на графиках $V_w(\sigma)$. Наличие этого участка, определяемого теплообменом между образцом и окружающей средой, приводит к невозможности идентификации процессов деформирования в упругой области и к снижению достоверности определения границ перехода между стадиями упругого и неупругого деформирования.

3.3 Исследования особенностей проявлений термоэмиссионных эффектов в «хрупких» геоматериалах при их одноосном сжатии (на примере образцов известняка)

3.3.1 Результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств образцов известняка методами электронной микроскопии и лазерно-ультразвуковой структуроскопии

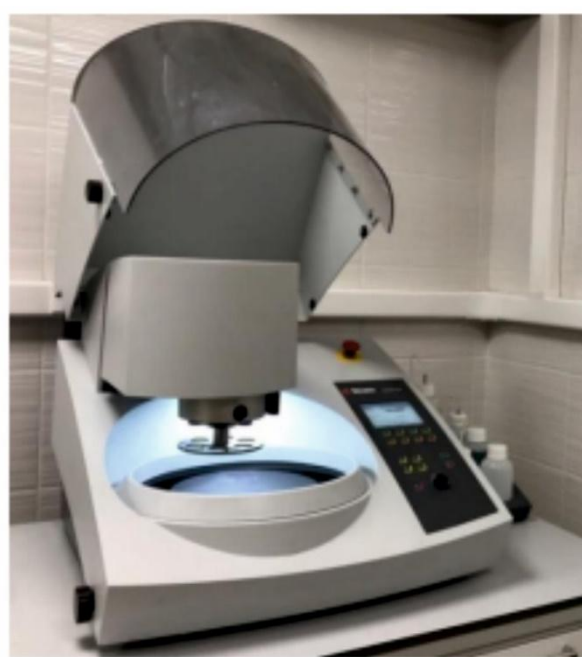
Эксперименты проводились на образцах известняка – наиболее часто используемого материала каменных конструкций [230]. Поскольку известняк относится к горным породам, обладающим высокой степенью неоднородности, для получения качественных и обоснованных результатов при выполнении описываемых исследований была создана выборка образцов с близкими значениями физико–механических параметров и схожими структурными особенностями [231, 232]. Для этого был проведен комплекс предварительных испытаний, включающий как стандартные методы определения физико–механических свойств горных пород, так и методы, основанные на

интроскопических способах исследования, например, растровую электронную микроскопию [233] и лазерную ультразвуковую диагностику [234, 235].

Цельный блок известняка был распилен с использованием оборудования для резки горных пород «Struers Labotom–15» (Рисунок 3.12а) на 100 образцов в форме параллелепипеда размером 25×25×55 мм. Далее из изготовленных образцов с помощью автоматического шлифовально-полировального станка «Struers Tegramin–25» (Рисунок 3.12б) были изготовлены тонкие аншлифы площадью 25×25 мм.



а)



б)

Рисунок 3.12 – Общий вид станков «Struers Labotom–15» (а)
и «Struers Tegramin - 25» (б)

Минеральный и элементный анализы были выполнены на серии аншлифов с использованием сканирующего электронного микроскопа Phenom ProX (Рисунок 3.13), работающего как в режиме оптического изображения для петрографического анализа, так и электронного изображения, по которому на базе энергодисперсионной системы определялся элементный состав.



Рисунок 3.13 – Общий вид сканирующего электронного микроскопа Phenom ProX

Анализ, проведенный с использованием Phenom ProX, показал, что для большинства образцов среднее содержание составляет: кальция 40 – 42,3 %, углерода 12,1 – 13,9 %, кислорода 45,1 – 47,5 %. Было обнаружено незначительное присутствие различных минеральных компонентов и примесей: кремния 0,2 – 0,3 %, магния 0,1 – 0,2 %, железа 0,1 %. Примеси были распределены равномерно по всей поверхности исследуемых образцов.

Поверхность исследованных аншлифов представлена зернистой структурой. На границе контактов зерен зафиксированы системы пор, занимающие 5–7 % от общей площади поверхности, значения характерных размеров пор лежат в пределах 40 – 450 мкм. Минеральный состав представлен кальцитом, содержание которого колебалось в пределах 97,5 – 98,3 %, незначительным количеством кварца – 1,5–2,3 % и доломитом – менее 0,5 %. Суммарный вклад остальных минералов мал (менее 0,1 %).

С учетом данных электронной микроскопии из первоначальной серии были отобраны образцы со схожими структурными особенностями. На втором этапе уже из этой серии необходимо было отобрать образцы с примерно одинаковыми значениями пористости. Оценка пористости осуществлялась с использованием

лазерной ультразвуковой структуроскопии, проведенной на автоматизированном дефектоскопе ГЕОСКАН-02М на пластинах размером 50×25 мм и толщиной около 4 – 5 мм, изготовленных из отобранных образцов. При этом учитывалось, что выбранная величина толщины пластин значительно превосходит значения зерен исследуемого геоматериала.

Принцип действия структуроскопа (Рисунок 3.14) основан на регистрации сигналов, полученных в результате рассеяния широкополосных акустических импульсов на различных неоднородностях образцов [235].

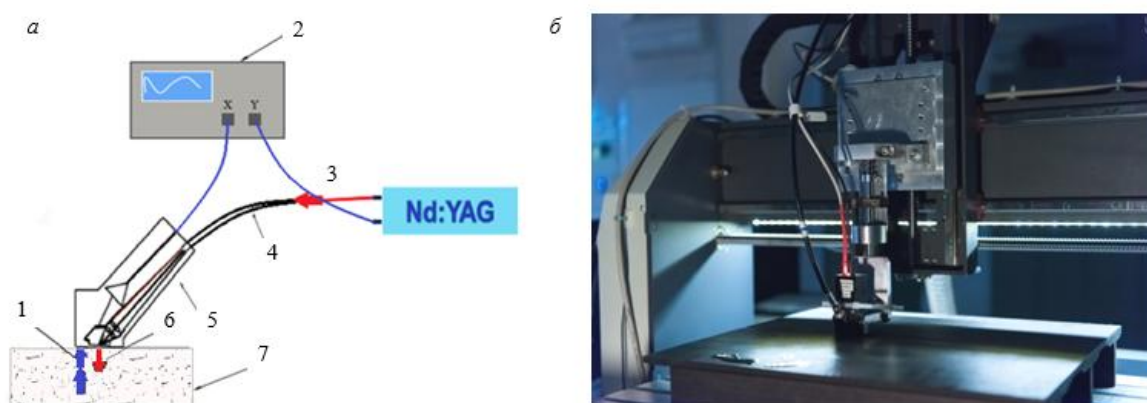


Рисунок 3.14. Схема (а) и внешний вид (б) лазерно-ультразвукового структуроскопа ГЕОСКАН-02М

- 1 – отраженные сигналы; 2 – аналого-цифровой преобразователь; 3 – короткий лазерный импульс; 4 – оптоволоконный кабель;
5 – лазерно–ультразвуковой преобразователь; 6 – зондирующие акустические импульсы; 7 – исследуемый образец

Сканирование проводилось по поверхности пластины с шагом 1 мм. С учетом толщины и времени двойного пробега акустического импульса по образцу в каждой точке сканирования рассчитывались скорости распространения продольных волн V_l . По времени задержки поперечной волны относительно опорного сигнала определялась ее скорость V_t . Были получены локальные значения скоростей упругих волн в 100 точках боковой поверхности каждого образца.

На Рисунок 3.15 показан пример пространственного распределения значений скоростей продольных волн V_l по боковой поверхности образца, полученных в результате широкополосного ультразвукового сканирования.

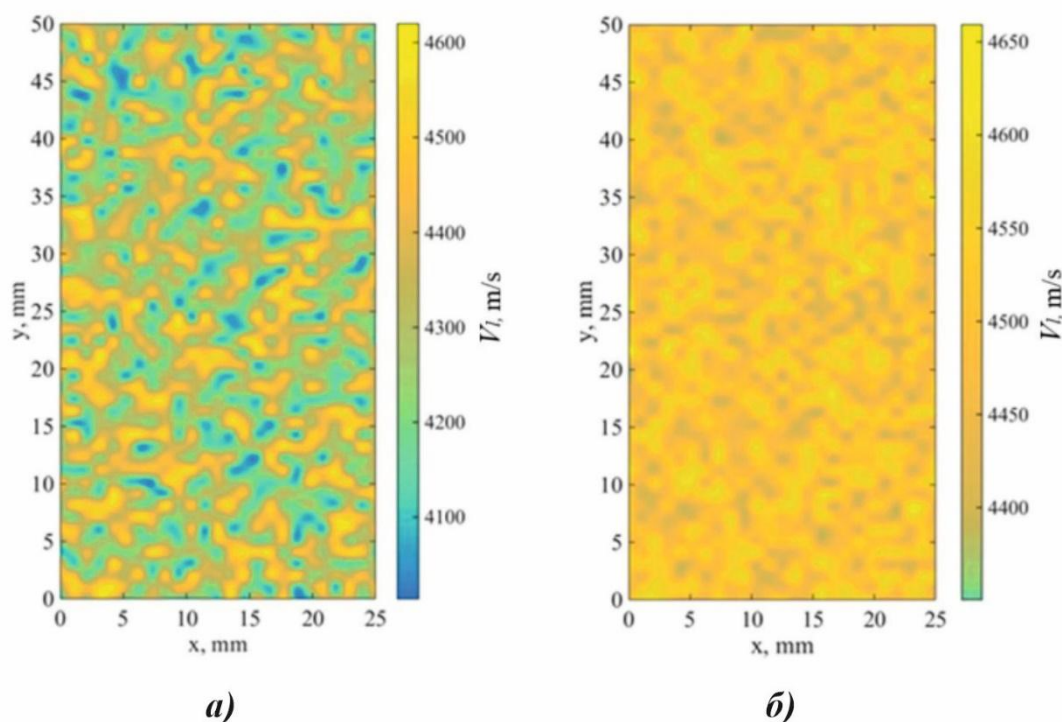


Рисунок 3.15. Плоскостное распределение значений скоростей продольных волн V_l для образцов известняка:

а) – неоднородный образец; б) – однородный

Распределение значений V_l , представленное на Рисунке 3.15а, демонстрирует их существенную пространственную и количественную изменчивость (скорости варьируются от 4350 до 4650 м/с), что позволяет отнести данный образец к группе «неоднородных». Вариативность значений V_l , полученных на другом образце и фиксируемая на Рисунке 3.15б, значительно меньше (скорости варьируются от 4350 до 4650 м/с), соответственно можем рассматривать образец как «однородный».

Далее из общего количества исследованных образцов были отобраны 15 образцов, которые по результатам широкополосного ультразвукового анализа были приняты «однородными». В Таблице 3.1 представлены значения средних скоростей продольных V_l и сдвиговых волн V_t для указанных образцов.

Таблица 3.1 – Результаты измерения скоростей упругих волн

№ образца	$V_l, \text{м/с}$	$V_t, \text{м/с}$
1	4506	2409
2	4185	2098
3	4540	2420
4	4520	2447
5	4517	2408
6	4758	2531
7	4534	2403
8	4501	2367
9	4245	2006
10	4526	2394
11	4575	2454
12	4289	2043
13	4523	2336
14	4534	2315
15	4696	2574

По приведенным данным можно рассчитать локальную пористость образцов [236]:

$$P_{\text{общ}} = \left(1 - \left(\frac{V_l}{V_0}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}, \quad (3.1)$$

где V_0 – скорость распространения продольной волны в материале при $P_{\text{общ}} = 0$, то есть при отсутствии пористости.

Для вычисления V_0 был разработан следующий алгоритм. Известно, что основные минералы, содержащиеся в известняке (кальцит и кварц), принадлежат к

тригональному классу симметрии [237]. В кристаллах тригональной сингонии только вдоль трех кристаллографических осей [100], [010] [001] распространяются чисто продольные волны, скорости V_1 , V_2 , V_3 которых определяются диагональными элементами матрицы жесткости C_{33} , C_{11} [237]:

$$\rho V_1^2 = C_{33}; \quad (3.2)$$

$$\rho V_2^2 = \rho V_3^2 = C_{11}, \quad (3.3)$$

где ρ – плотность кристалла.

Во всех остальных направлениях распространяются квазипродольные волны, фазовые скорости которых определяют из уравнения Грина – Кристоффеля [237], а их значения могут существенно отличаться от значений скоростей чистых мод. Поскольку в известняке минералы кальцита и кварца хаотически ориентированы, то для вычисления скорости V_{10} необходимо выполнить усреднение по всем направлениям, что является достаточно трудоемкой процедурой. Поэтому для оценки V_0 по известным значениям коэффициентов матрицы жесткости $\{C_{ij}\}$, где $i, j = 1, \dots, 6$, для кальцита и кварца, приведенным в Таблице 3.2, были найдены скорости V_1 , V_2 , V_3 вдоль кристаллографических осей [100], [010], [001] и дополнительно в направлениях [110], [011] [101] скорости V_{12} , V_{23} , V_{13} для каждого минерала [237]. Методика расчета значений квазипродольных волн представлена в Приложении В. Далее было выполнено усреднение по всем шести направлениям с учетом вклада кальцита и кварца.

Таблица 3.2 – Коэффициенты матрицы жесткости и значения плотности для кальцита и кварца

Минерал	C_{11} , ГПа	C_{12} , ГПа	C_{44} , ГПа	C_{33} , ГПа	C_{13} , ГПа	C_{66} , ГПа	ρ , кг/м ³
Кварцит	137	45,2	34,2	79,2	44,8	45,9	2980
Кварц	86,8	7,1	58,3	105,9	-11,9	39,9	2650

В результате проведенных расчетов среднее значение скорости V_0 в образце известняка без пор составило 5300 м/с. На Рисунке 3.16 представлены результаты расчета значений пористости образцов, проведенного по формуле (3.1). Показатели общей пористости $P_{\text{общ}}$ образцов №№ 1, 3, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 13, 14 принадлежат одному интервалу, который составляет 13 – 14 %.

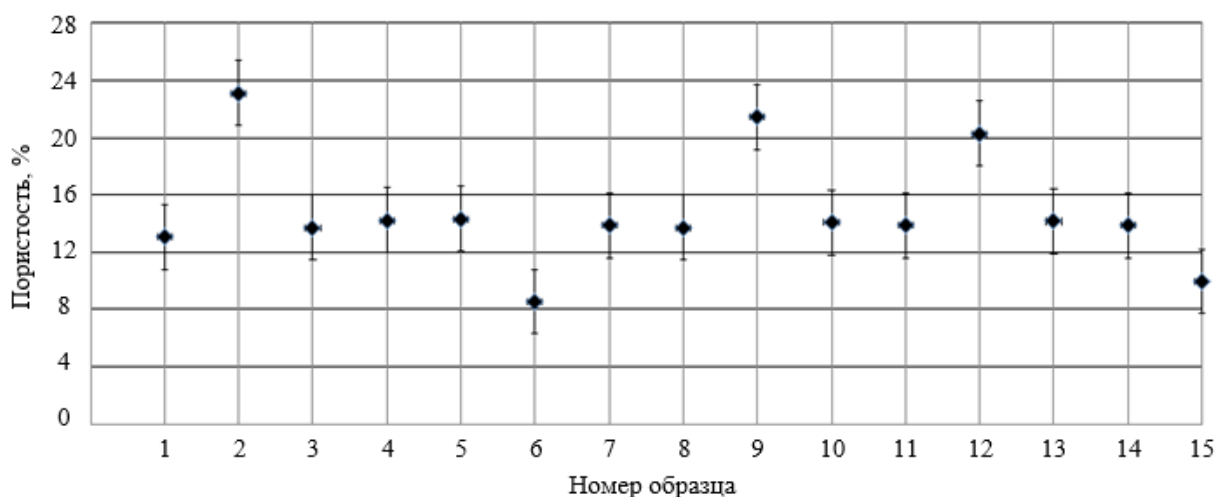


Рисунок 3.16 – Значения общей пористости $P_{\text{общ}}$ для исследуемых образцов известняка

Тем самым на основе результатов лазерно–ультразвуковой диагностики образцов известняка и их последующей отбраковки («цензурирования») была создана статистически значимая выборка образцов, обладающих слабой степенью изменчивости физико–механических свойств. Образцы из указанной выборки были использованы в экспериментах по оценке влияния водонасыщения геоматериалов на их термоактивность при нагружении, а оставшиеся (менее однородные) образцы были подвергнуты испытаниям на одноосное сжатие с одновременной регистрацией механических, акустоэмиссионных и терморadiометрических параметров.

3.3.2. Результаты экспериментов по одноосному испытанию образцов известняка

Испытания образцов известняка, результаты которых изложены в данном разделе, выполнялись на испытательной машине Instron 150LX с помощью описанного выше автоматизированного комплекса, позволяющего вести синхронную регистрацию механических, акустоэмиссионных и терморadiационных параметров. Одноосное сжатие образцов известняка осуществлялось в режиме постоянной скорости продольной деформации ($d\varepsilon/dt = \text{const}$).

В качестве примера [238] на Рисунке 3.17 представлены графики изменения во времени осевого напряжения $\sigma(t)$ (1), интенсивности ИК – излучения $V_w(t)$ (2) и скорости счета АЭ $\dot{N}(t)$ (3) при деформировании образца известняка в режиме одноосного нагружения при постоянной скорости изменения продольной деформации ($d\varepsilon/dt = \text{const} = 0,02 \text{ мм/с}$).

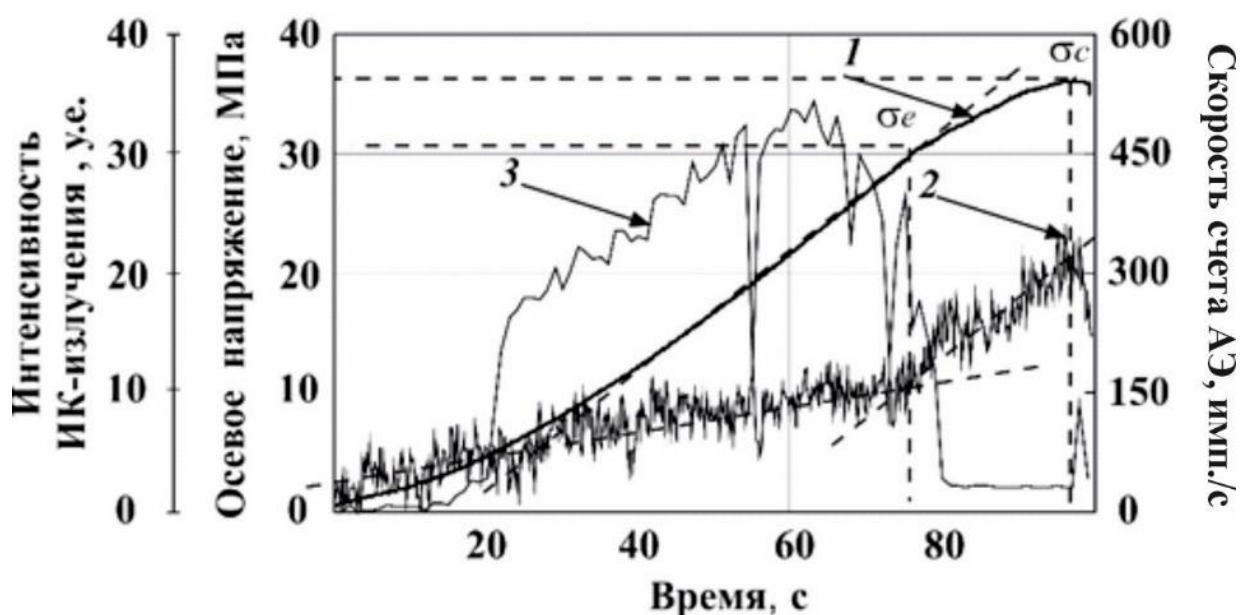


Рисунок 3.17 – Зависимости осевого напряжения $\sigma(t)$ (1), интенсивности ИК–излучения $V_w(t)$ (2) и скорости счета АЭ $\dot{N}(t)$ (3) от времени при испытаниях образца известняка при $d\varepsilon/dt = \text{const} = 0,02 \text{ мм/с}$

На Рисунке 3.18 приведена соответствующая диаграмма « σ – ε », полученная в ходе описываемого эксперимента.

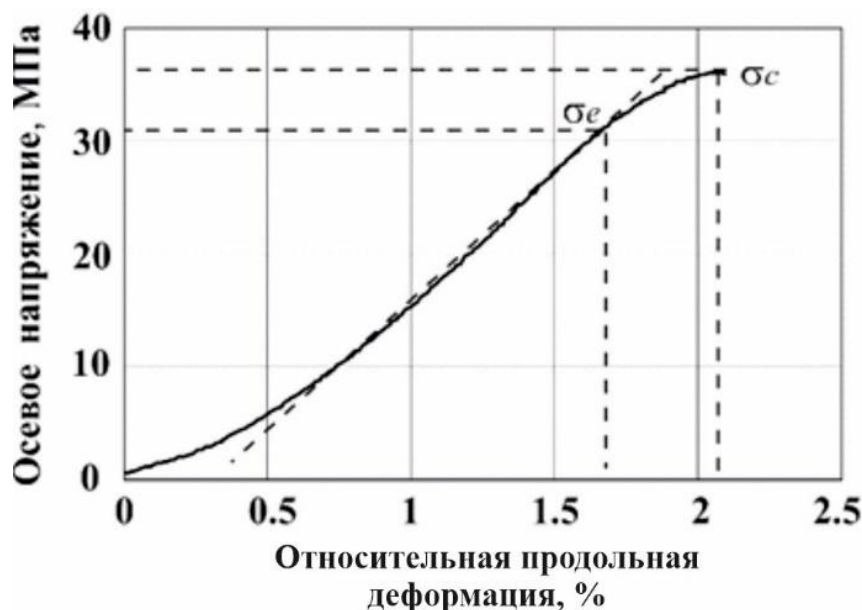


Рисунок 3.18 – Зависимость осевого напряжения σ от относительной продольной деформации при испытаниях образца известняка при $d\varepsilon/dt = \text{const} = 0,02$ мм/с

Анализируя зависимость $V_w(t)$ (Рисунок 3.17, зависимость 2), можно сделать вывод, что ее возрастание становится существенно более интенсивным в достаточно явно фиксируемой точке $\sigma \approx 30$ МПа (рис. 3.17, зависимость 1). Указанное значение σ , как видно из соответствующей диаграммы « σ – ε » (Рисунок 3.18), соответствует пределу упругости σ_e материала образца. Предел прочности σ_c (Рисунок 3.18) материала испытываемого образца также достоверно фиксируется по характерным и совпадающим во времени точкам перегиба графиков $\sigma(t)$ и $V_w(t)$ (Рисунок 3.17).

Рассмотрим зависимость $\dot{N}(t)$ (зависимость 3, Рисунок 3.17). Значения $\dot{N}(t)$ остаются незначительными до момента времени, когда напряжения σ в образце становятся более 5 МПа. Далее начинается участок возрастания скорости счета АЭ, в пределах которого $\dot{N}(t)$ достигает максимальных значений в конце зоны линейно–упругого деформирования (Рисунок 3.17, зависимость 3). Следующее за этим участком постепенное убывание значений $\dot{N}(t)$ заканчивается

кратковременным «затишьем», которое предшествует «всплеску» скорости счета АЭ после достижения осевым напряжением в образце предела прочности σ_c .

Следует отметить, что аналогичные результаты получены при тестировании метода ИК–радиометрии на образцах угля [239].

Таким образом, получаемые при соответствующей обработке записей $\sigma(t)$, $V_w(t)$ и скорости счета АЭ $\dot{N}(t)$ результаты оценки уровня нагрузки, при котором начинается нелинейное деформирование испытываемого образца известняка, согласуются между собой. Данное обстоятельство указывает на то, что ИК–радиометрия может эффективно отслеживать динамику развития нелинейного деформирования и разрушения не только «пластичных», но и «хрупких» геоматериалов. Причем фиксация моментов инициирования таких процессов может вестись по появлению аномальных изменений значений, измеряемых терморadiометрических параметров или характеристик скоростей их изменений во времени.

3.3.3. Экспериментальная оценка влияния степени водонасыщения образцов известняка при одноосном деформировании на параметры ИК–излучения

Для проведения экспериментов по оценке влияния водонасыщения образцов известняка на кинетику теплового излучения, сопутствующего их деформированию, были отобраны образцы 1, 3, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 13, 14, которые разделили две группы (по 5 образцов в каждой) (Рисунок 3.19).

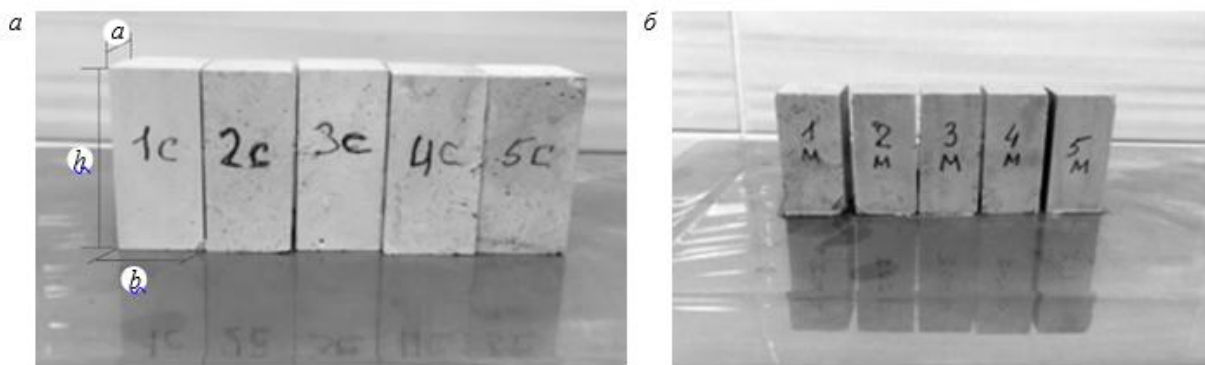


Рисунок 3.19 – «Сухие» (а) и водонасыщенные (б) образцы известняка

Образцы одной группы помещались в воду на семь суток. После этого определялась масса образцов и рассчитывалась их плотность, значения которых представлены в Таблицах 3.3 и 3.4.

Таблица 3.3 – Геометрические и плотностные параметры «сухих» образцов известняка

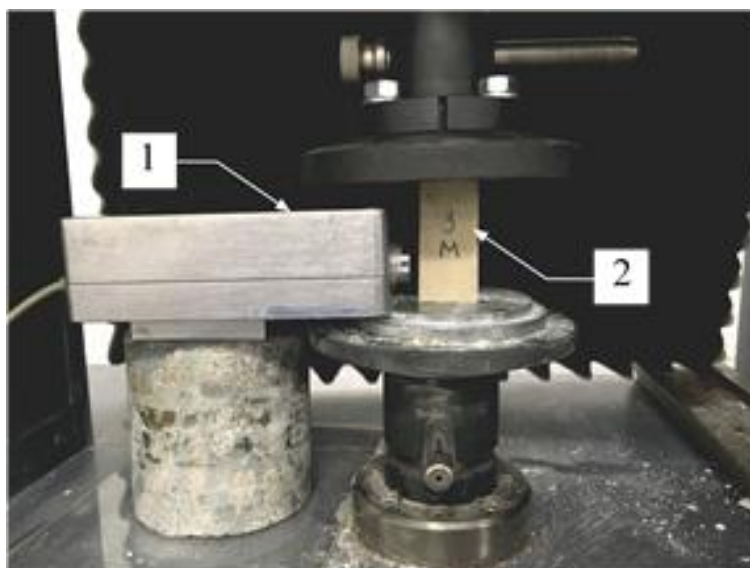
№	m , г	a , мм	b , мм	$S = a \cdot b$, мм ²	h , мм	$V = S \cdot h$, мм ³	ρ_d , кг/м ³
1с	72,18	25,65	23,50	602,78	50,29	30314	2381
2с	72,05	25,06	24,34	609,96	49,95	30468	2365
3с	71,98	25,15	24,10	606,12	50,07	30348	2372
4с	72,46	25,32	25,07	634,77	50,01	31745	2283
5с	72,05	25,50	25,50	650,25	50,27	32688	2204

Таблица 3.4 – Геометрические и плотностные параметры водонасыщенных образцов известняка

№	m , г	a , мм	b , мм	$S = a \cdot b$, мм ²	h , мм	$V = S \cdot h$, мм ³	ρ_w , кг/м ³
1м	75,15	24,64	24,03	592,10	49,97	29587	2540
2м	74,26	24,42	24,36	594,87	50,28	29910	2483
3м	75,25	23,61	24,63	581,51	50,13	29151	2581
4м	75,09	24,50	24,56	601,72	50,54	30410	2469
5м	74,55	25,65	23,46	601,75	50,22	30219	2467

Средние значения плотностей «сухих» $\rho_{d_{cp}}$ и водонасыщенных образцов $\rho_{w_{cp}}$ составили 2321 кг/м³ и 2508 кг/м³ соответственно.

Общий вид экспериментального стенда для испытаний образцов известняка представлен на Рисунке 3.20.



Рисунке 3.20 – Экспериментальный стенд: 1– ИК–радиометр, 2– образец известняка

В качестве примера на Рисунке 3.21 представлены графики изменений во времени интенсивности ИК–излучения при деформировании «сухого» $V_{w1}(t)$ и водонасыщенного $V_{w2}(t)$ образцов известняка в режиме одноосного сжатия при постоянной скорости изменения продольной деформации $d\varepsilon/dt = 0,01$ мм/с, а на Рисунке 3.22 соответствующие диаграммы « $\sigma - \varepsilon$ ».

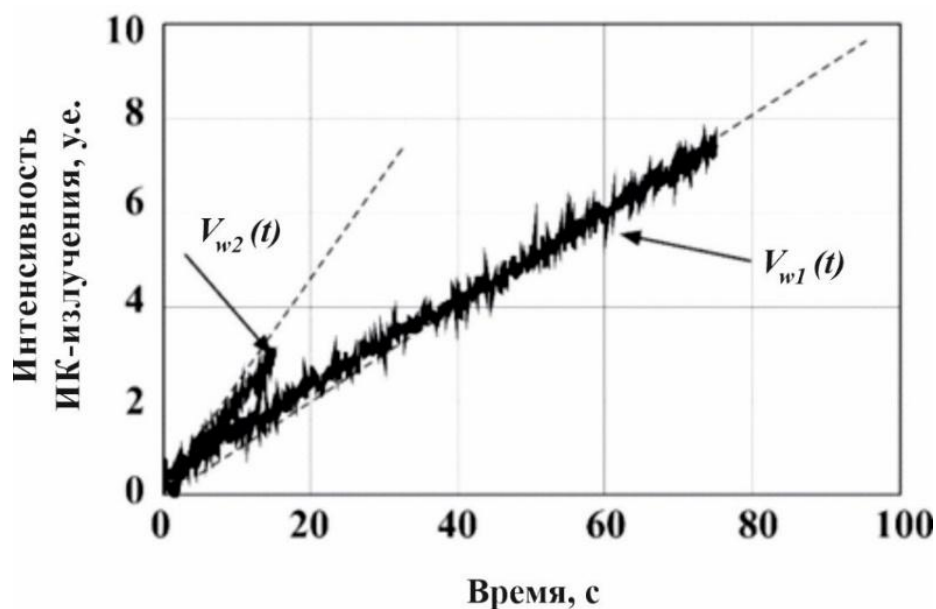


Рисунок 3.21 – Зависимость интенсивности инфракрасного излучения от времени для «сухих» $V_{w1}(t)$ и водонасыщенных $V_{w2}(t)$ образцов известняка при $d\varepsilon/dt = \text{const} = 0,01$ мм/с



Рисунок 3.22 – Зависимости осевого напряжения σ от относительной продольной деформации для сухого (1) и водонасыщенного (2) образцов известняка при $d\varepsilon/dt = \text{const} = 0,01$ мм/с

Зависимости $V_{w1}(t)$ и $V_{w2}(t)$ демонстрируют характер изменения интенсивности ИК–излучения во временных интервалах, соответствующих промежуткам протекания линейной стадии деформирования образцов известняка. Анализируя зависимости $V_{w1}(t)$ и $V_{w2}(t)$ на Рисунке 3.22, можно сделать вывод, что угол наклона прямой, являющейся трендовой составляющей функции $V_{w2}(t)$, существенно больше угла наклона соответствующей прямой для функции $V_{w1}(t)$, что свидетельствует о более высокой термоэмиссионной активности водонасыщенного образца известняка. Полученный результат согласуется с выводами работы [240], в которой также фиксируется увеличение интенсивности ИК–излучения подвергаемых сжатию образцов горных пород при повышении их водонасыщения.

Диаграммы « σ – ε » подтверждают наличие существенной зависимости изменений прочностных и деформационных характеристик горных пород от степени их водонасыщения [241]. В частности, определенные по графикам, представленным на Рисунке 3.22, значения пределов прочности для «сухого» σ_d и водонасыщенного σ_w образцов известняка различаются примерно в 1,6 раза ($\sigma_d \approx 74$ МПа, а $\sigma_w \approx 45$ МПа).

Таким образом, изменения как теплофизических, так и физико-механических характеристик образцов под влиянием водонасыщения являются основным фактором, обуславливающим наблюдаемый термомеханический эффект.

В ходе анализа полученных результатов для подтверждения их адекватности необходимо провести оценочные расчеты приращений температуры ΔT для «сухих» и водонасыщенных образцов. Тогда, как следует из формулы Кельвина (1.1), при одинаковом приращении напряжений твердого тела $\Delta\sigma$ при его одноосном адиабатическом деформировании связь между изменениями температуры ΔT для «сухих» и водонасыщенных образцов примет следующий вид:

$$\frac{\rho_d c_d}{\alpha_d} \cdot \frac{\Delta T_d}{T_0} = \frac{\rho_w c_w}{\alpha_w} \cdot \frac{\Delta T_w}{T_0}. \quad (3.2)$$

В работе [242] для различных типов твердых тел показана справедливость выражения для линейного коэффициента термического расширения α :

$$\alpha \sim \frac{const}{\sqrt{E}}, \quad (3.3)$$

где E – модуль упругости материала при одноосной деформации.

Тогда с учетом (3.3) формула (3.2) приобретет следующий вид:

$$\rho_d c_d \sqrt{E_d} \Delta T_d = \rho_w c_w \sqrt{E_w} \Delta T_w. \quad (3.4)$$

Значения модулей E_d и E_w для «сухого» и водонасыщенного образцов можно оценить по соответствующим зависимостям осевого напряжения от относительной продольной деформации. Для образцов, чьи диаграммы « σ – ε » представлены на Рисунке 3.22, результаты таких вычислений величин модулей упругости составили: $E_d = 69$ ГПа и $E_w = 42$ ГПа. Расчетные значения ρ_d и ρ_w были взяты из Таблиц 3.3 и 3.4.

С целью получения ориентировочных значений удельной теплоемкости c для водонасыщенных и «сухих» образцов известняка следует воспользоваться известным определением [243], в котором под удельной теплоемкостью гетерогенной среды понимается арифметическое средневзвешенное всех присутствующих в среде минеральных компонент с долей k_i и их удельной теплоемкостью c_i :

$$c = \sum c_i k_i. \quad (3.5)$$

Поскольку основным компонентом материала испытываемых образцов является кальцит, то из (3.5) была получена формула расчета удельной теплоемкости водонасыщенного известняка C_d :

$$c_d = \sum c_i k_i = \frac{c_{\text{кальц}} \rho_{\text{кальц}} V_{\text{кальц}} + c_{\text{воды}} \rho_{\text{воды}} V_{\text{воды}}}{\rho_{w_{\text{изм}}} V}, \quad (3.6)$$

где $c_{\text{кальц}}$ – удельная теплоемкость кальцита, $\rho_{\text{кальц}}$ – плотность кальцита, $V_{\text{кальц}}$ – объем кальцита, $c_{\text{воды}}$ – удельная теплоемкость воды, $\rho_{\text{воды}}$ – плотность воды, $V_{\text{воды}}$ – объем воды, $P_{\text{откр}}$ – открытая пористость образца известняка, $\rho_{w_{\text{изм}}}$ – экспериментально измеренная плотность водонасыщенного образца, V – объем образца известняка.

Определение открытой пористости $P_{\text{откр}}$ производилось по методу Архимеда в соответствии с [244]. Объем открытых пор в образце определялся по разнице его массы в «сухом» и водонасыщенном состоянии, а средняя открытая пористость $P_{\text{откр}}$ по формуле:

$$P_{\text{откр}} = \frac{V_{\text{порср}}}{V_{\text{ср}}}, \quad (3.7)$$

где $V_{\text{ср}}$ – среднее значение объемов испытанных образцов, $V_{\text{порср}}$ – среднее значение объемов открытых пор в этих же образцах.

По результатам расчетов, среднее значение открытой пористости составило $P_{\text{откр}} = 9,5 \%$, при этом общая пористость $P_{\text{общ}}$ составила $13,7 \%$. Учитывая, что объем кальцита связан с суммарной пористостью $P_{\text{общ}}$, включающей открытую $P_{\text{откр}}$ и закрытую ($P_{\text{общ}} - P_{\text{откр}}$), т.е. $V_{\text{кальц}} = V(1 - P_{\text{общ}})$, получим выражение для расчета удельной теплоемкости водонасыщенного известняка c_w :

$$c_w = \sum c_i k_i = \frac{c_{\text{кальц}} \rho_{\text{кальц}} (1 - P_{\text{общ}}) + c_{\text{воды}} \rho_{\text{воды}} P_{\text{откр}}}{\rho_{w_{\text{изм}}}}. \quad (3.8)$$

Аналогично получено выражение для расчета удельной теплоемкости «сухого известняка:

$$c_d = \sum c_i k_i = \frac{c_{\text{кальц}} \rho_{\text{кальц}} (1 - P_{\text{общ}})}{\rho_{w_{\text{изм}}}}. \quad (3.9)$$

При этом в расчете не учитывалась удельная теплоемкость воздуха $c_{\text{воздуха}}$, сосредоточенного в порах сухого образца, поскольку ее величина (1005 Дж/(кг·К)) существенно меньше значения $c_{\text{воды}}$. Результаты расчета удельных теплоемкостей для «сухих» c_d и водонасыщенных c_w образцов по формулам (3.8) и (3.9) представлены в Таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты расчета удельной теплоемкости для образцов

«Сухие» образцы		Водонасыщенные образцы	
№	$c_d, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	№	$c_w, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
1с	1059	1м	1149
2с	1023	2м	1177
3с	1015	3м	1131
4с	1021	4м	1182
5с	1044	5м	1185
Среднее значение	1032	Среднее значение	1165

В дальнейших расчетах по формуле (3.2) участвуют средние значения удельных теплоемкостей для сухих и водонасыщенных образцов, приведенные в Таблице 3.5. Кроме того, в расчетах $T_0 = 300 \text{ К}$.

Подставив в формулу (3.2) значения необходимых для расчета величин, получим, что отношение приращения температуры водонасыщенных образцов к приращению температуры «сухих» образцов составляет $\frac{\Delta T_w}{\Delta T_d} \approx 1,1 - 1,2$, что подтверждают полученные экспериментальные зависимости, представленные на Рисунке 3.21.

Выводы по главе 3

1) Проведены испытания на одноосное сжатие образцов «пластичных» и «хрупких» геоматериалов при различных режимах монотонного изменения нагрузки с одновременной регистрацией изменений во времени терморadiометрических, акустоэмиссионных и механических параметров.

2) Результаты проведенных экспериментов указывают, что эффективность терморadiометрических измерений, как с точки зрения идентификации процессов упругого деформирования, так и с точки зрения фиксации границ между стадиями процессов изменения напряженного состояния, повышается при увеличении скорости нагружения. С другой стороны, показано, что, в отличие от снижения эффективности терморadiометрических измерений при «медленном» ($d\sigma/dt \leq 0,3$ МПа/с) нагружении, имеет место повышение эффективности акустоэмиссионных измерений, в частности, при фиксации граничных точек между стадиями деформирования. Сделанный вывод позволил сформулировать **третье научное положение:**

«Установлено, что для повышения надежности оценки изменений напряженно–деформированного состояния геоматериалов необходимо комплексировать результаты ИК– и акустоэмиссионных измерений, что обусловлено диаметрально противоположным характером реакции последних на скорость приложения нагрузки».

3) Таким образом, экспериментами, проведенными на «пластичных» и «хрупких» геоматериалах, доказано, что основой терморadiометрической диагностики напряженно–деформированного состояния горных пород являются изменения характера временных зависимостей интенсивности теплового излучения с их поверхности, обусловленные переходами между стадиями деформирования материала. Сделанный вывод позволил сформулировать **четвертое научное положение:**

«Доказано, что основой терморadiометрической диагностики структурных особенностей и напряженно–деформированного состояния горных пород являются изменения характера временных зависимостей интенсивности теплового излучения с их поверхности, обусловленные

переходами между упругой и пластической стадиями деформирования материала».

4) Проведенные комплексные экспериментальные исследования, подкрепленные выполненными оценочными расчетами, демонстрируют значительное влияние водонасыщенности пористых материалов на их механические и теплофизические характеристики, выражающиеся в существенном увеличении термоактивности, инициируемой происходящими в них деформационными процессами, что обуславливает необходимость учета выявленной закономерности при идентификации изменений во времени напряженного состояния массивов горных пород в реальных условиях.

ГЛАВА 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИК–ИЗЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ГЕОМАТЕРИАЛОВ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ ИЗМЕНЕНИИ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ

4.1. Измерения и анализ вариаций интенсивности ИК–излучения образцов горных пород при низкоамплитудных квазипериодических нестационарных режимах нагружения

Первый этап этого раздела представлен экспериментами, в которых образцы горных пород подвергались низкоамплитудным квазипериодическим воздействиям [220, 245]. Генерация таких воздействий осуществлялась с помощью маятникового нагрузочного устройства, специально сконструированного на основе стенда для испытания грунтов (Рисунке 4.1). Во время проведения испытаний проводилась одновременная регистрация параметров нагружения образцов и интенсивности ИК–излучения.

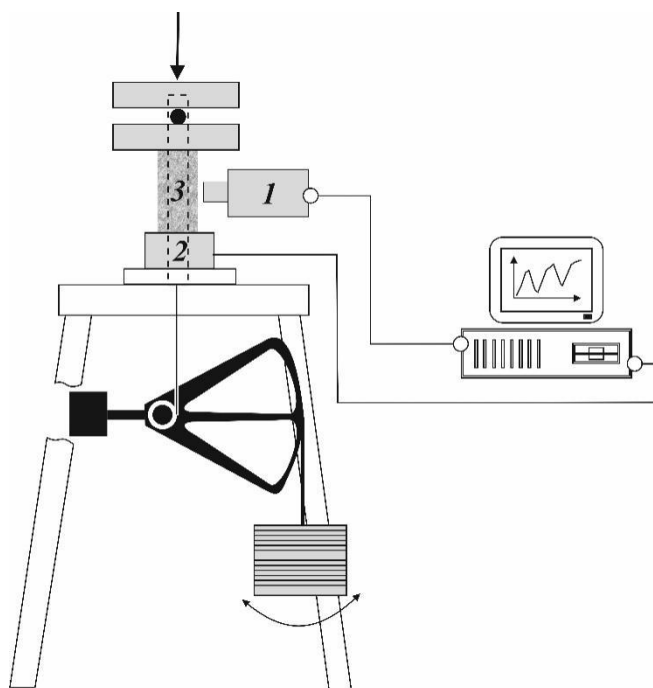


Рисунок 4.1 – Схема стенда для испытаний образцов геоматериалов при квазипериодических нагружениях: 1 – ИК–радиометр, 2 – тензодатчик, 3 – образец горной породы

Пример характерной записи выходных сигналов датчика нагрузки $V_\sigma(t)$ и ИК–радиометра $V_w(t)$, отражающих эволюцию отклика среды на квазипериодическое воздействие, представлен на Рисунке 4.2, на котором видно, что реальные результаты ИК–измерений обладают весьма сложной структурой.

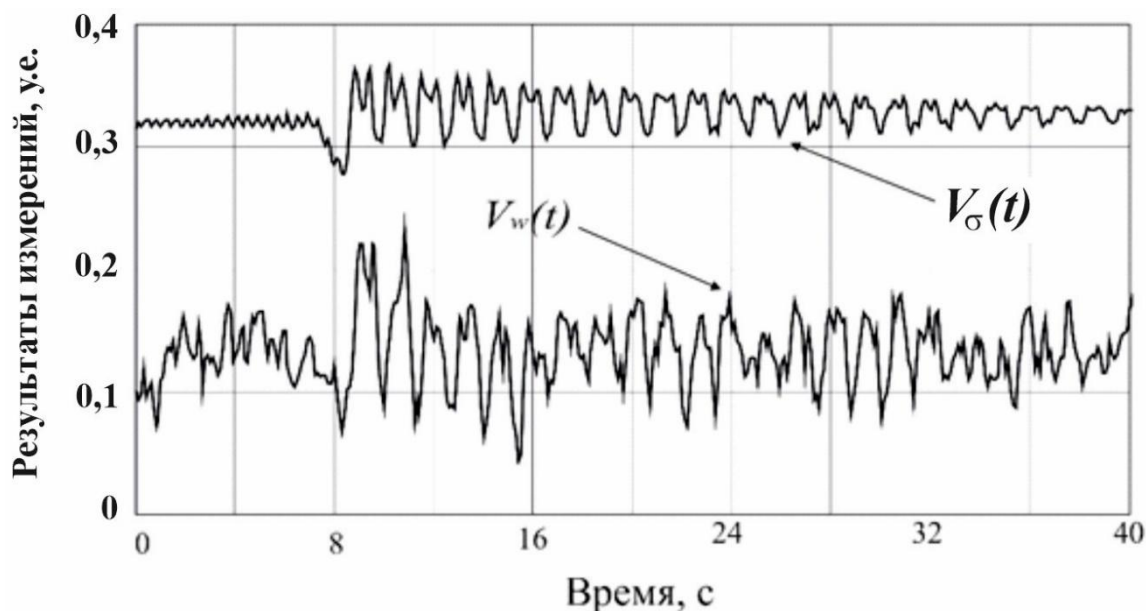


Рисунок 4.2 – Экспериментальные результаты измерений выходных сигналов датчика нагрузки $V_\sigma(t)$ (1) и ИК–радиометра $V_w(t)$ (2)

В зависимости $V_w(t)$, наряду с существенно нестационарной (в данном эксперименте высокочастотной) составляющей, непосредственно связанной с механическими процессами в образце, содержится дополнительная высокочастотная компонента, отражающая неизбежное наличие случайных аппаратурных и других «шумов». График функции $V_\sigma(t)$, характеризует тот же процесс нагружения образца, но имеет более гладкий нестационарный вид. Очевидно, что по представленным на Рисунке 4.2 зависимостям оценить степень идентичности $V_w(t)$ и "эталонного" сигналов без специальной обработки практически невозможно.

При этом выполнялась коррекция обрабатываемых временных последовательностей с целью удаления из них низкочастотных «трендов», обусловленных изменениями внешних тепловых условий во время опыта и представляющих собой низкочастотный шум. Такие низкочастотные

составляющие $F_w(t)$ и $F_\sigma(t)$ функций $V_w(t)$ и $V_\sigma(t)$ выделялись с использованием стандартных процедур статистической фильтрации случайных процессов [194, 246 – 248].

При дальнейшем анализе данных измерений вместо $V_w(t)$ и $V_\sigma(t)$ рассматривались функции:

$$\begin{aligned} U_w(t) &= V_w(t) - F_w(t), \\ U_\sigma(t) &= V_\sigma(t) - F_\sigma(t), \end{aligned} \quad (4.1)$$

практически не зависящие от низкочастотных составляющих и имеющие нулевые средние значения.

Для вычисления оценок изменений во времени напряжений $\sigma_w(t)$ и $\sigma(t)$ (МПа) соответственно по зависимостям $U_w(t)$ и $U_\sigma(t)$ использовались переходные коэффициенты, величины которых определялись по данным тарировки, проводившейся перед каждой серией экспериментов [249]. Для этого к образцу прикладывались ступенчатые нагрузки $\Delta\sigma_{tar}$, величина которых определялась по показаниям эталонного динамометра, установленного между тензодатчиком и плитой пресса. При этом для каждого изменения нагрузки $\Delta\sigma_{tar}$ измерялись «скачки» уровней выходных сигналов ИК–радиометра ΔU_w и тензодатчика ΔU_σ . Затем осреднением величин $\Delta U_{w_{tar}}/\Delta\sigma_{tar}$ и $\Delta U_{\sigma_{tar}}/\Delta\sigma_{tar}$ оценивались коэффициенты A_w и A_σ перехода от вариаций выходных сигналов ΔU_w и ΔU_σ (В) к вариациям $\Delta\sigma$ (МПа). С использованием значений A_w и A_σ вычислялись значения функций $\sigma_w(t)$ и $\sigma(t)$ (МПа):

$$\begin{aligned} \sigma_w(t) &= U_w(t)/A_w, \\ \sigma(t) &= U_\sigma(t)/A_\sigma. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Для количественного описания экспериментальных записей и идентификации «полезной» информации привлекались методы спектрального анализа, основанные на Фурье– и вейвлет–преобразованиях [250 – 253].

При анализе рядов данных традиционно доминирует спектрально–корреляционный подход [254, 255]. Однако его классические инструменты – расчёт корреляционных функций и спектра мощности – применимы только к

стационарным процессам и требуют длительных временных рядов для достоверных результатов [246, 251]. Также следует отметить, что перекрытие частотных диапазонов полезного сигнала и шума – достаточно распространённая трудность при обработке данных различных измерений, прежде всего геофизических [251]. Попытки подавить помехи в рядах таких данных средствами классической частотной фильтрации приводят к искажению или утрате части полезной информации, в результате чего определение характеристик, регистрируемых зависимостей, становится неоднозначным. Это вынуждает исследователей использовать упрощающие допущения при работе с реальными нестационарными рядами данных, чтобы адаптировать их под стандартные спектральные алгоритмы [256].

Более перспективным решением для анализа пространственных данных со сложной многомасштабной структурой, либо сигналов с меняющимся со временем спектральным составом выступают методы на основе вейвлет–преобразования, получившие в последние десятилетия широкое распространение [252, 253, 257].

Суть подхода заключается в разложении нестационарного случайного сигнала по базисным функциям $\Psi_{a,b}(t)$, сформированным из материнского (анализирующего) вейвлета $\Psi(t)$ путём масштабирования (a) и сдвига (b) [252, 253, 257]:

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right). \quad (4.3)$$

Вычисление вейвлет – преобразований функций $f(t)$, интеграл от которых в бесконечных пределах имеет конечное значение, осуществляется путем свертки исследуемой функции $f(t)$ с базисной вейвлет–функцией [252, 253, 257]:

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \Psi_{a,b}^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (4.4)$$

где $\Psi_{a,b}^*(t)$ означает комплексное сопряжение для $\Psi_{a,b}(t)$.

Примером базисной функции служит вейвлет Морле [252, 253, 257]:

$$\Psi(t) = \exp\left(i2\pi f_c t - \frac{t^2}{2}\right), \quad (4.5)$$

где f_c [Гц] – центральная частота вейвлета.

Вид такой базисной функции представлен на Рисунке 4.3.

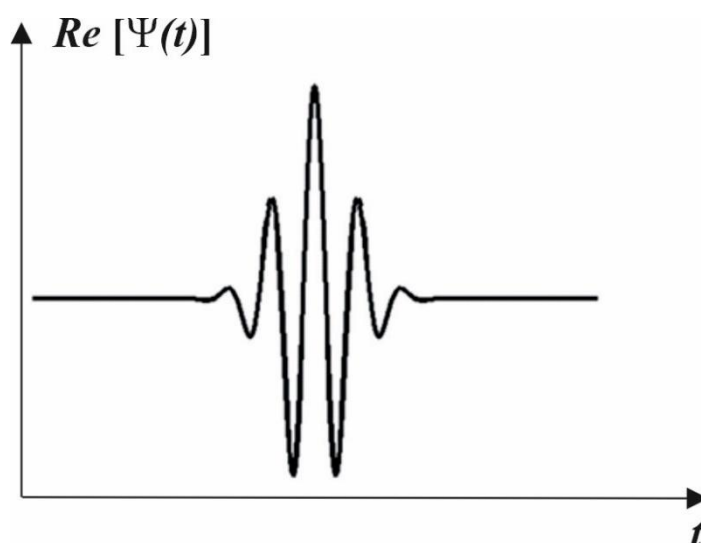


Рисунок 4.3 – Общий вид действительной части вейвлета Морле

Данная функция дает результаты, наиболее согласованные с терминами Фурье–анализа [252, 253, 257]. В частности, вейвлет Морле обладает частотной локализацией, лучшей среди других базисов, и в связи с этим является наиболее предпочтительным для решения задач идентификации частот составляющих сигнала [252, 253, 257].

Результатом непрерывного вейвлет–преобразования сигнала является двумерная функция $W(a,b)$, а функцию $|W(a,b)|$, являющуюся оценкой спектра, обычно называют скалограммой (вейвлет–спектром), подчеркивая тем самым ее способность описывать распределение энергии сигнала по масштабам. На практике, как правило, анализируются дискретные сигналы, поэтому вместо непрерывной функции $|W(a,b)|$ принято использовать дискретный вейвлет–спектр $|W(a_i, b_j)|$, где пределы изменения коэффициентов a_i и b_j определяются значением частоты дискретизации сигнала. При построении скалограммы точки на плоскости параметров (a_i, b_j) отображают в зависимости от величины коэффициентов $|W(a_i, b_j)|$ цветом различной интенсивности [253, 258].

На Рисунке 4.4 показаны графики определенных после упомянутой корректировки исходных записей оценок, зависящих от частоты f спектральных плотностей зависимостей $\sigma(t)$ и $\sigma_w(t)$, а на Рисунках 4.5 и 4.6 адаптированные

скалограммы с базовым вейвлетом Морле соответствующих зависимостей $\sigma_w(t)$ и $\sigma(t)$.

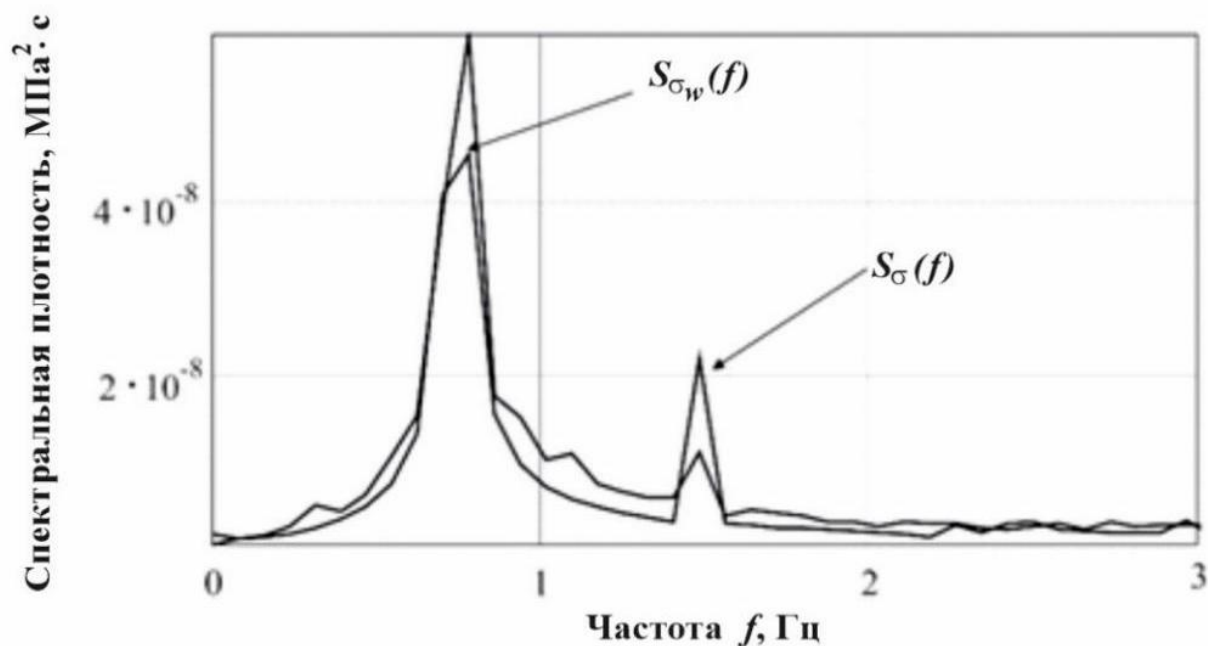


Рисунок 4.4 – Спектральные плотности $S_{\sigma_w}(f)$ и $S_{\sigma}(f)$ зависимостей $\sigma_w(t)$ и $\sigma(t)$, МПа²·с

Графики представленных на Рисунке 4.4 спектральных плотностей зависимостей $\sigma(t)$ и $\sigma_w(t)$ позволяют выявить по 2 основных пика, соответствующих частотам $f_1 = 0,75$ Гц и $f_2 = 1,5$ Гц, что свидетельствует о совпадении спектральных характеристик исследуемых сигналов.

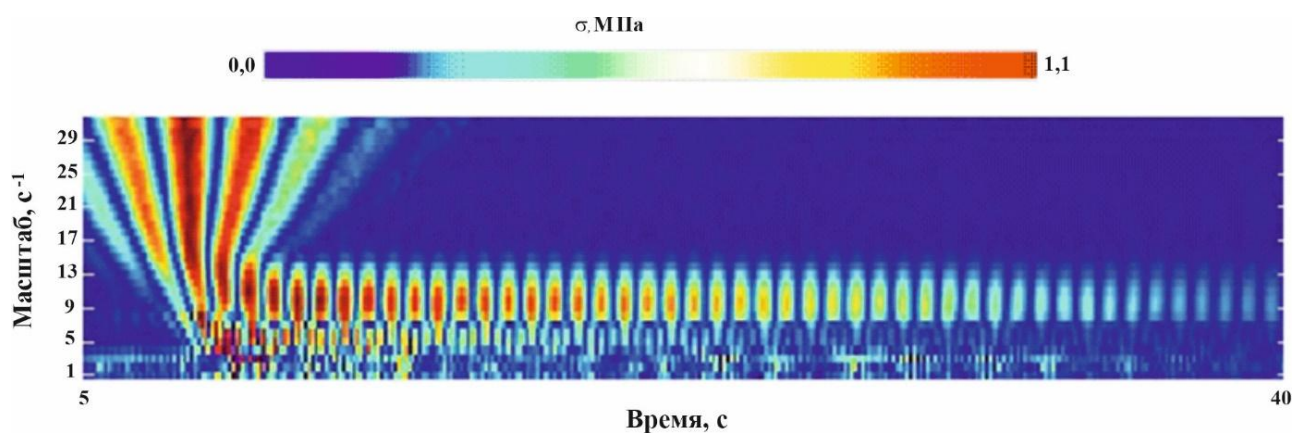


Рисунок 4.5 – Скалограмма (вейвлет–спектр) зависимости $\sigma(t)$ (интервал 5 – 40 с)

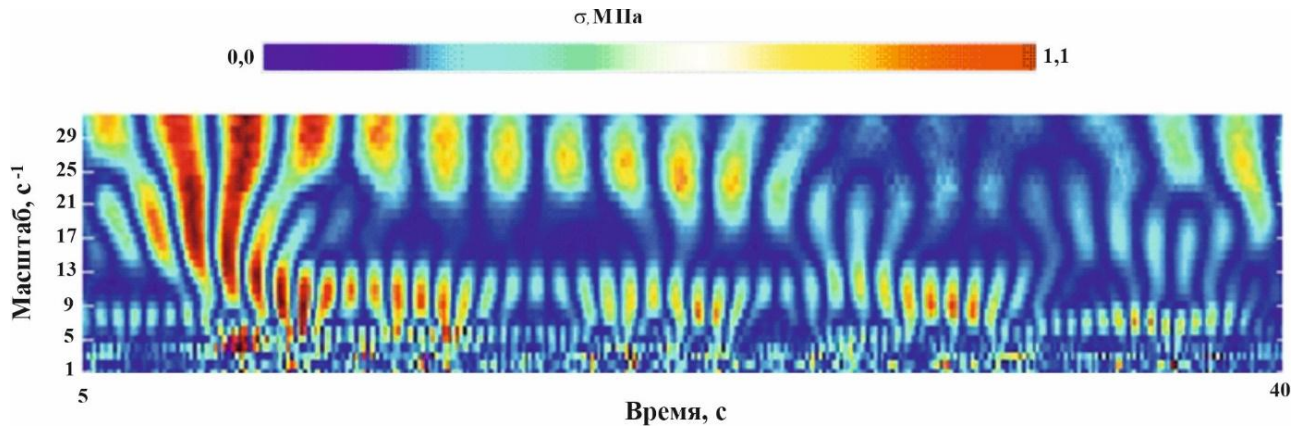


Рисунок 4.6 – Скалограмма (вейвлет–спектр) зависимости $\sigma_w(t)$
(интервал 5 – 40 с)

На представленных скалограммах по горизонтальной оси отложена величина сдвига вейвлет– функции, а по вертикальной – масштаб (в диапазоне от 1 до 64). Темно-красный цвет соответствует максимальному значению, которое принимают вейвлет коэффициенты, тёмно-синий – минимальному. Следует отметить, что параметр a имеет размерность $[c^{-1}]$, а параметр b размерность $[c]$.

Для временных рядов данных, зная центральную частоту анализирующего вейвлета f_c (для вейвлета Морле $f_c=0,8125$ Гц), можно определить значение частоты f_i , соответствующей масштабу a_i с помощью выражения [253, 258]:

$$f_i = \frac{f_c}{a_i \Delta t}. \quad (4.6)$$

Результаты расчета показывают, что доминирующим частотам в зависимостях $\sigma(t)$ и $\sigma_w(t)$ соответствуют следующие масштабные коэффициенты (при $\Delta t = 0,1$ с для частоты $f_1 = 0,75$ Гц – $a \approx 10$ c^{-1} ; для частоты $f_2 = 1,5$ Гц – $a \approx 5$ c^{-1}). В нижней части обоих вейвлет–спектров на указанных масштабных уровнях, достаточно четко фиксируются периодичности, вызванные определенными выше высокочастотными составляющими сигналов. При этом особенностью выявленных на скалограммах периодичностей является изменчивость их доминирующих частот и амплитуд с течением времени.

Таким образом, Фурье– и вейвлет–спектрограммы дополняют друг друга: первая обнаруживает в анализируемых данных гармонические или квазигармонические компоненты с высоким частотным, но с нулевым временным

разрешением, а вторая позволяет локализовать гармоники по времени (с плохим разрешением по масштабу). Данный факт позволяет сделать вывод, что предложенные алгоритмы обработки результатов терморадиометрических измерений, особенностью которых является временная изменчивость частотных диапазонов полезной и шумовой составляющих сигналов, позволяют эффективно идентифицировать по таким данным параметры, характеризующие квазипериодические деформационные процессы в нагружаемых геоматериалах.

4.2 Измерения и анализ вариаций интенсивности ИК–излучения образцов горных пород при высокоамплитудных циклических режимах нагружения

Далее приводится описание исследований, являющихся продолжением работ по разработке бесконтактной методики диагностики изменений напряженно–деформированного состояния геоматериалов. Проведенные эксперименты имели целью тестирование метода в условиях многократно повторяющихся последовательных высокоамплитудных циклов “нагружения–разгрузки” (максимальное значение осевого напряжения в образце σ_{max} составляет $\approx 0,5 - 0,9 \cdot \sigma_c$), приводящих к переходу от линейного деформирования образцов геоматериалов к нелинейному [259 – 263].

4.2.1. Результаты ИК–диагностики образцов горных пород при периодических режимах нагружения в условиях одноосного сжатия с увеличивающейся от цикла к циклу величиной максимальной нагрузки

В настоящее время экспериментальные исследования по выявлению влияния повторного (или циклического) нагружения на долговечность как материалов конструкций подземных сооружений, так и вмещающих пород получили широкое распространение [9, 10, 264 – 269]. Известно [9, 10, 264], что в процессе циклического нагружения геоматериалов происходят значительные изменения их

механического состояния, фиксируемые в т.ч. и по изменениям характера зависимостей « σ – ε », соответствующих различным циклам. Так, например, в экспериментах на одноосное сжатие образца горной породы деформационный «эффект памяти» [105, 137] проявляется в виде резкого изменения угла наклона кривой « σ – ε » при достижении напряжением σ своего максимального испытанного ранее значения σ^I . При этом график зависимости «напряжение – деформация» при повторном нагружении состоит из двух частей: при $\sigma \leq \sigma^I$ образец деформируется практически линейно (участок CDA кривой « σ – ε » на Рисунке 4.6), а при $\sigma > \sigma^I$ образец деформируется по траектории, являющейся продолжением кривой, зафиксированной в 1–м цикле нагружения (участок AE кривой « σ – ε » на Рисунке 4.6).



Рисунок 4.6 – Схематичное изображение зависимости «осевое напряжение – продольная деформация» для геоматериалов при их циклическом деформировании

Также следует отметить еще две характерные особенности видоизменения кривых « σ – ε » для геоматериалов, проявляющиеся при их циклическом деформировании: изменение величины приращения остаточных деформаций и уменьшение модуля деформации. Как было показано в Главе 1, указанные особенности находят отражение и в изменениях параметров полей различной

физической природы (акустическая, электромагнитная эмиссия и др.), сопутствующих процессам изменения напряженного состояния геоматериалов [87, 137]. Возможности эффективного использования эмиссионных откликов такого рода в геомеханических исследованиях широко представлена в соответствующей научно–технической литературе [87, 137]. Однако исследования таких эффектов для электромагнитного излучения в ИК–диапазоне не проводились.

Испытания выполнялись на экспериментальном стенде, описанном в Главе 3. Для испытаний были подготовлены цилиндрические образцы каменной соли диаметром 52 мм и высотой 100 мм [259, 260]. В проведенных экспериментах скорость изменения продольной деформации на участках нагружения или разгрузки поддерживалась постоянной $|d\varepsilon/dt| = \text{const} = 0,01$ мм/с. Выбор значения $d\varepsilon/dt$ основан на результатах проведенных ранее экспериментов (см. Главу 3) и обеспечивает информативность и достоверность данных ИК– и АЭ–измерений.

На Рисунке 4.7 представлены графики изменения во времени осевого напряжения $\sigma(t)$ (1), интенсивности ИК–излучения $V_w(t)$ (2) и суммарного счета акустической эмиссии $N(t)$ (3), построенные по результатам испытаний одного из образцов в режиме «нагрузка – разгрузка» [259, 260]. В данном эксперименте число циклов «нагружение – разгрузка» равнялось двум. Нагружение образца проводилось до значения $\sigma = \sigma^I \approx 13$ МПа, после чего осуществлялась его разгрузка до 2 МПа. Во втором цикле испытаний образец доводился до разрушения. Зафиксированное значение предела прочности образца σ_c составило ≈ 25 МПа.

На графиках (Рисунок 4.7) фиксируется существенное изменение наклона кривых $\sigma(t)$ (1) и $N(t)$ (3) в момент времени, соответствующий достижению осевым напряжением при повторной нагрузке значения $\sigma = \sigma^I$. Подобное поведение зависимостей $\sigma(t)$ и $N(t)$ при описываемом режиме испытаний можно отнести к проявлениям «эффекта памяти». Аналогичные выводы можно сделать и в отношении зависимости $V_w(t)$ (2), по характерным особенностям которой также можно оценить значение σ^I .

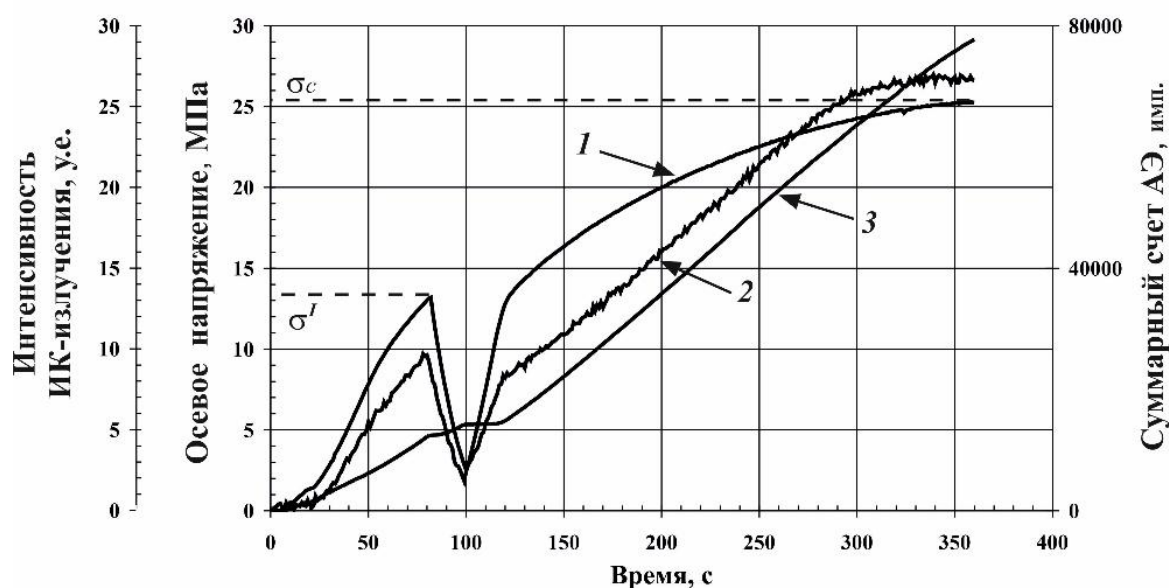


Рисунок 4.7 – Зависимости осевого напряжения $\sigma(t)$ (1), интенсивности ИК–излучения $V_w(t)$ (2) и суммарного счета АЭ $N(t)$ (3) от времени при $d\varepsilon/dt = \text{const} = 0,01$ мм/с [259, 260]

На Рисунке 4.8 приведены зависимости суммарного счета АЭ $N(\sigma)$ и интенсивности ИК–излучения $V_w(\sigma)$ от осевого напряжения σ , а на Рисунке 4.9 – зависимости осевого напряжения $\sigma(\varepsilon)$, суммарного счета АЭ $N(\varepsilon)$ и интенсивности ИК–излучения $V_w(\varepsilon)$ от относительной продольной деформации [259, 260].

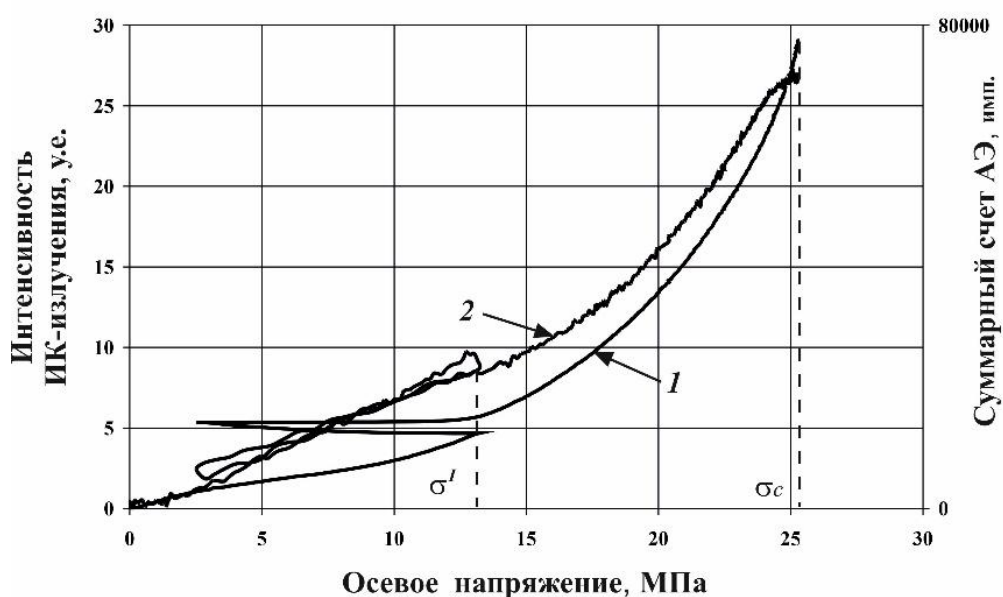


Рисунок 4.8 – Зависимости суммарного счета АЭ $N(\sigma)$ (1) и интенсивности ИК–излучения $V_w(\sigma)$ (2) от осевого напряжения σ [259, 260]

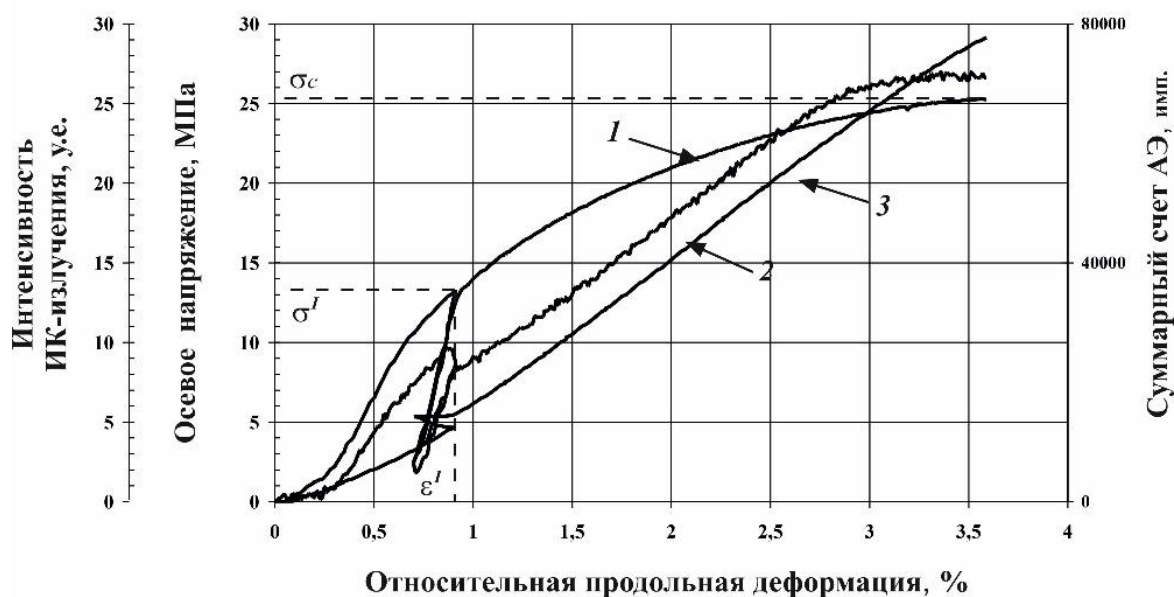


Рисунок 4.9 – Зависимости осевого напряжения $\sigma(\varepsilon)$ (1), суммарного счета АЭ $N(\varepsilon)$ (2) и интенсивности ИК–излучения $V_w(\varepsilon)$ (3) от относительной продольной деформации [259, 260]

По графикам с большой точностью определяются значения аргументов, в которых изменяется угол наклона исследуемых экспериментальных зависимостей, что позволяет однозначно оценить не только максимальное значение напряжения σ^I , достигнутое в первом цикле (Рисунок 4.8), но и соответствующее значение относительной продольной деформации ε^I (Рисунок 4.9).

Далее приведен пример результатов испытаний одного из образцов каменной соли (принадлежащего серии образцов, описанной в подразделе 3.2. Главы 3) в режиме «многоциклового» одноосного «нагружения–разгрузки» с увеличивающейся от цикла к циклу величиной максимального напряжения. При этом в первом цикле максимальное значение осевого напряжения в испытываемом образце составило $\sigma^I = 5$ МПа, а в последующих циклах деформирования максимальное напряжение увеличивалось на $\Delta\sigma = 5$ МПа. Всего было осуществлено 5 полных циклов «нагружения–разгрузки», разрушение образца наступило на 6 цикле при величине осевого напряжения $\sigma_c \approx 30$ МПа. В описываемых испытаниях скорость изменения продольной деформации на

участках нагружения или разгрузки поддерживалась постоянной $|d\varepsilon/dt|=const=0,02$ мм/с.

На Рисунке 4.10 для данного эксперимента приведены кривые изменения во времени осевого напряжения $\sigma(t)$, относительной продольной деформации и интенсивности ИК-излучения $V_w(t)$, а на Рисунке 4.11 – зависимости осевого напряжения $\sigma(\varepsilon)$ (1), и интенсивности ИК-излучения $V_w(\varepsilon)$ (2) от относительной продольной деформации.

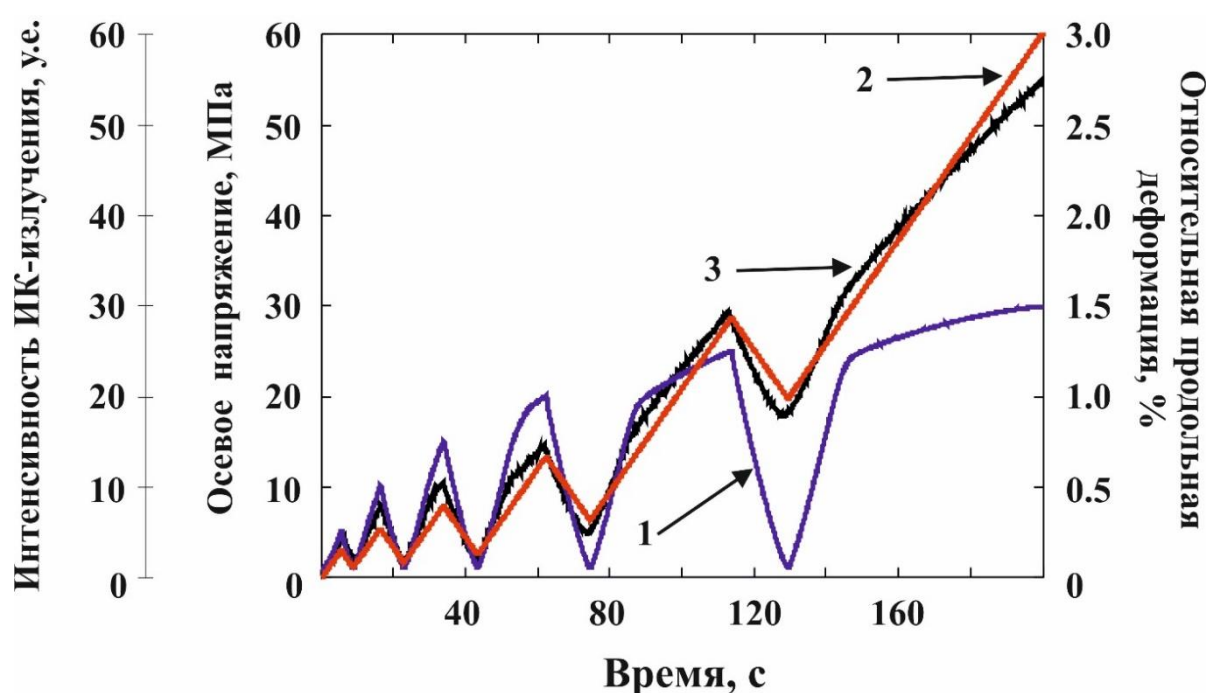


Рисунок 4.10 – Зависимости осевого напряжения $\sigma(t)$ (1), относительной продольной деформации (2) и интенсивности ИК-излучения $V_w(t)$ (3) от времени при $|d\varepsilon/dt|=const=0,02$ мм/с

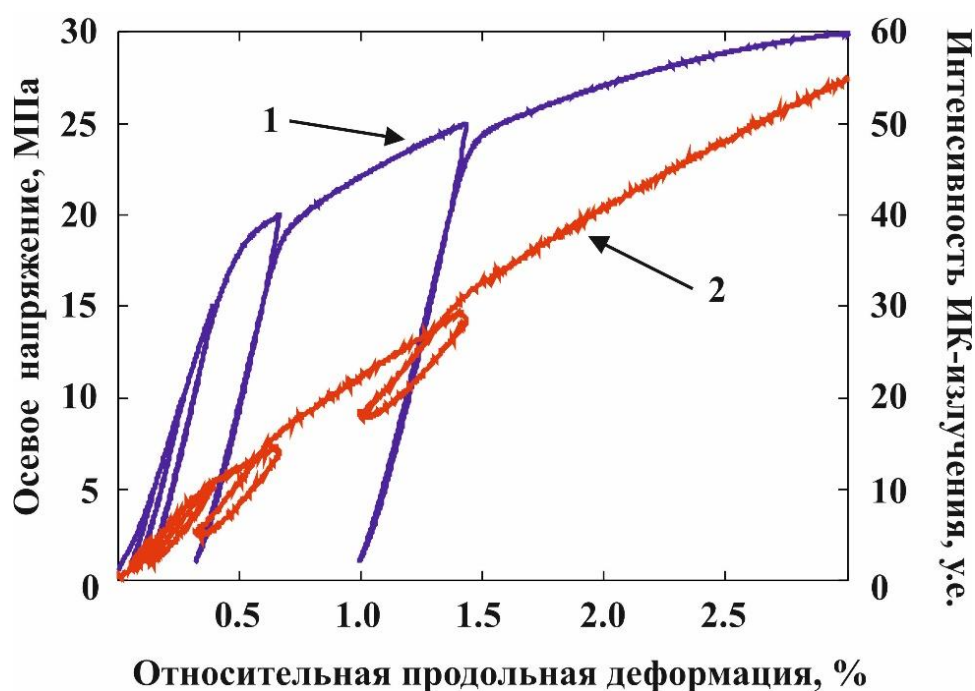


Рисунок 4.11 – Зависимости осевого напряжения $\sigma(\varepsilon)$ (1) и интенсивности ИК–излучения $V_w(\varepsilon)$ (2) от относительной продольной деформации

На Рисунках 4.10 и 4.11 четко фиксируются обозначенные выше особенности как временных зависимостей $\sigma(t)$ и $V_w(t)$, так и соответствующих им функций $\sigma(\varepsilon)$ и $V_w(\varepsilon)$, обусловленные переходами между упругой и пластической стадиями деформирования испытываемого образца.

Представленные результаты указывают на эффективность терморadiометрических измерений для диагностики предистории процессов деформирования при описанных режимах испытаний. Однако, как установлено выше, информативность терморadiометрических измерений понижается при уменьшении скорости нагружения, а акустоэмиссионные измерения – наоборот, при «больших» скоростях нагружения могут не давать надежной информации о протекании механических процессов. Поэтому целесообразным представляется комплексный подход к диагностике предистории нагружения, основанный на совместных измерениях механических параметров, ИК– и АЭ– сигналов.

4.2.2. Результаты ИК–диагностики образцов горных пород при близких к предельным режимам периодического нагружения в условиях одноосного сжатия

Следующая серия опытов посвящена испытаниям образцов каменной соли на многоцикловое высокоамплитудное циклическое нагружение [251 – 263]. Для испытаний были подготовлены цилиндрические образцы каменной соли диаметром 35 и высотой 70 мм. Выбор модельного материала обусловлен тем, что на нем можно с достаточной эффективностью исследовать в лабораторных условиях механические изменения, характерные как для горных пород, так и для грунтов.

В описываемом “типовом” эксперименте на каждом цикле “нагружение – разгрузка” нагрузка возрастала до значения $\sigma_{max} \approx 18$ МПа, после чего осуществлялась его разгрузка до значения 0,1 МПа.

Предел прочности на одноосное сжатие σ_c испытываемых образцов с учетом данных прочностных испытаний других образцов из той же серии составляет около 20 МПа. Выбор отношения $\sigma_{max}/\sigma_c = 0,9$ соответствует относительному максимальному уровню напряжений, принимаемому в лабораторных исследованиях по моделированию влияния циклических многократных нагружений устойчивости подземных газохранилищ [266, 267, 270].

Отметим, что σ_{max} значительно превосходит предел упругости $\sigma_{max} \approx 10 - 12$ МПа, характерный для исследуемых образцов каменной соли при однократном испытании [226 – 228]. На Рисунке 4.9 приведены кривые изменения во времени относительной продольной деформации (а), осевого напряжения $\sigma(t)$ (б) и интенсивности ИК–излучения $V_w(t)$ (в) при деформировании образца каменной соли в условиях последовательных циклов “нагружения – разгрузки” ($|d\varepsilon/dt| = const = 3$ мм/мин) при постоянном значении амплитуды нагрузки [261]. Разрушение образца при указанной амплитуде изменения напряжений произошло на восьмом цикле.

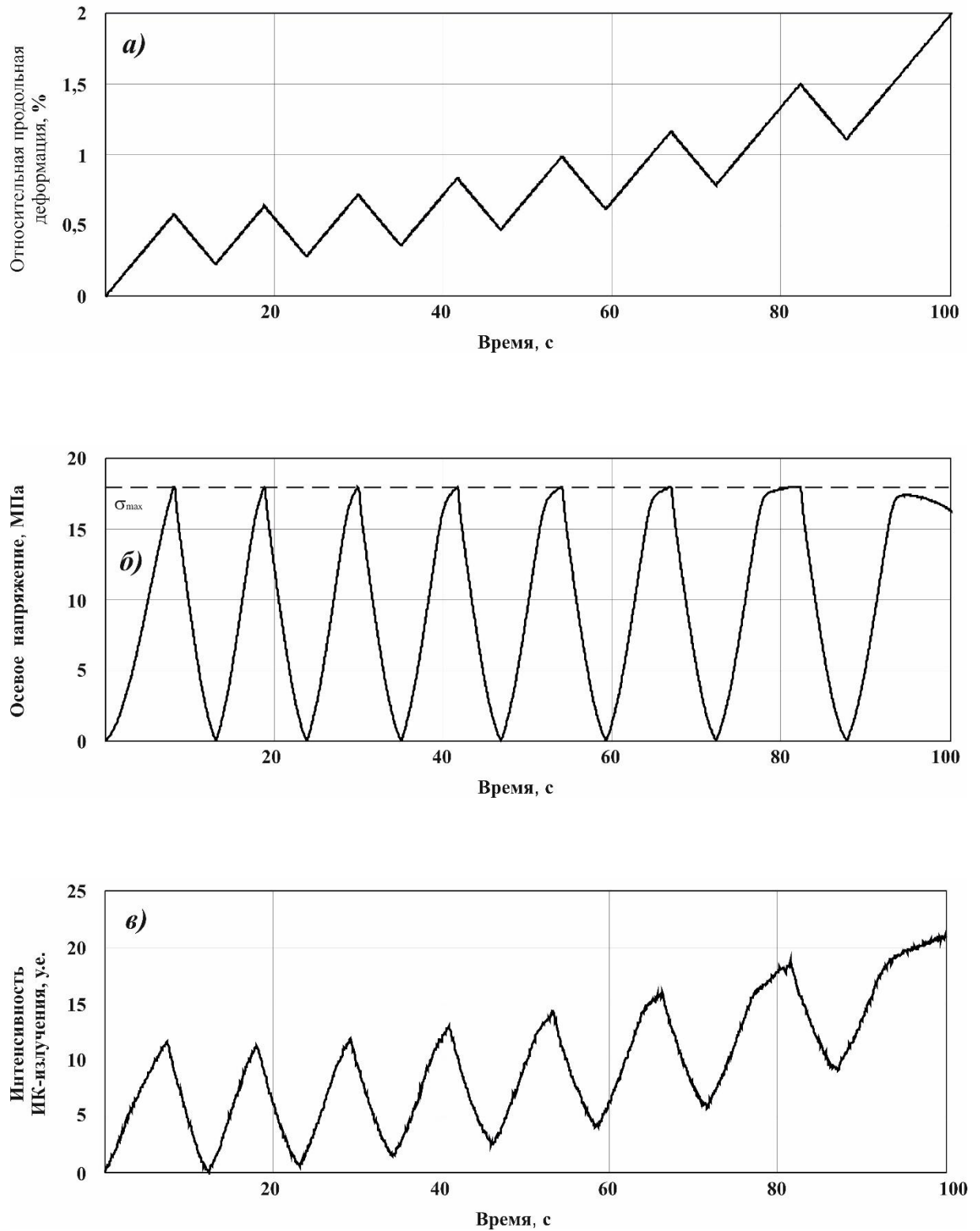


Рисунок 4.9 – Зависимости относительной продольной деформации (а), осевого напряжения $\sigma(t)$ (б) и интенсивности ИК-излучения $V_w(t)$ (в) от времени при $|d\varepsilon/dt| = const = 3$ мм/мин.

Более наглядно особенности рассматриваемого процесса циклического деформирования могут быть представлены в координатах « $\sigma-\varepsilon$ », при этом площадь каждой гистерезисной петли характеризует поглощенную на соответствующем цикле механическую энергию, часть которой переходит в теплоту. Диаграмма $\sigma(\varepsilon)$ для рассматриваемого образца показана на Рисунке 4.10 [261], где отчетливо прослеживается уменьшение “раскрытия” гистерезисной петли на втором цикле по сравнению с первым циклом “нагрузка–разгрузка” и увеличение “раскрытия” последующих петель вплоть до момента разрушения образца. Такая особенность диаграмм $\sigma(\varepsilon)$ наблюдается для многих типов грунтов и горных пород, подвергаемых циклическому деформированию [9, 10, 264 – 269].

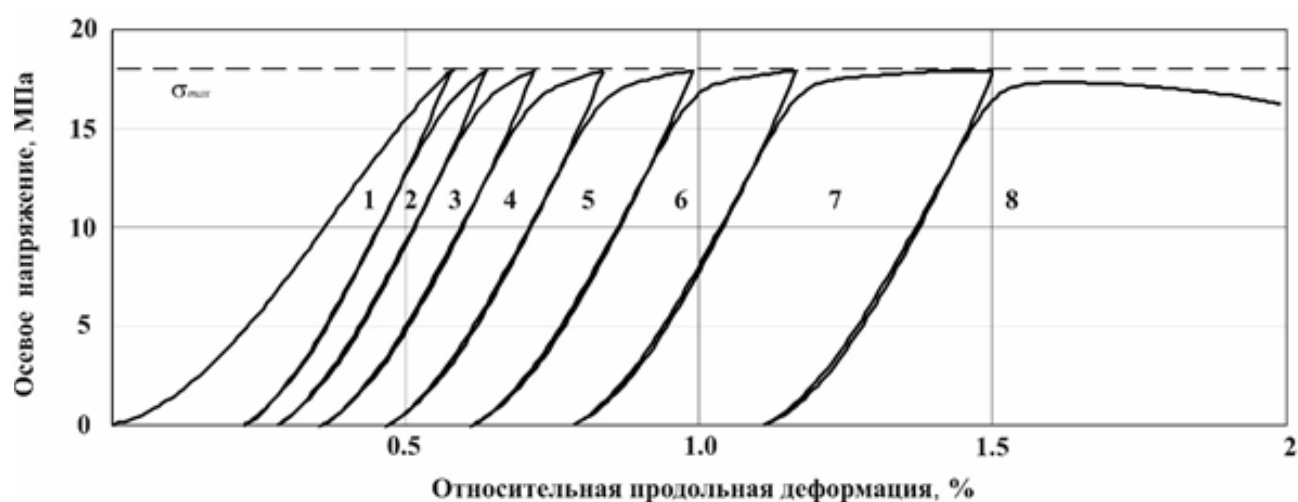


Рисунок 4.10 – Зависимость осевого напряжения $\sigma(\varepsilon)$ от относительной продольной деформации (1 – 8 — номера циклов)

Различие площадей гистерезисных петель, соответствующих первому и второму циклам деформирования, объясняется тем, что вид нагрузочной ветви диаграммы $\sigma(\varepsilon)$ первого цикла совпадает с соответствующим видом характерной зависимости $\sigma(\varepsilon)$ каменной соли при монотонном одноосном сжатии, а в отличие от первого, во втором цикле не только разгрузка, но и нагружение происходят по практически линейной траектории. Это определяется тем, что уплотнение образца произошло уже на первом цикле и дальнейшее деформирование не сопровождается активным ростом деформаций за счет “залечивания” существовавших в образце дефектов. Рост “раскрытия” гистерезисных петель на последующих после второго

циклах связан уже с возрастанием остаточных деформаций, вызванных увеличением дефектности образца. На третьем и последующих циклах на нагрузочных ветвях диаграммы $\sigma(\varepsilon)$ наблюдается резкое изменение наклона кривых при приближении значений σ к σ_{max} , которое также указывает, что в пределах ветви нагружения каждого из этих циклов характер процесса деформирования переходит от упругого к упругопластическому.

На Рисунке 4.11 представлены зависимости значений объемной плотности рассеянной за n -й ($n = 1-7$) цикл энергии W_n (1), рассчитанных по площади гистерезисных петель, и соответствующих приращений значений интенсивности теплового излучения ΔV_{W_n} (2), оцененных по кривой $V_w(t)$ [261].

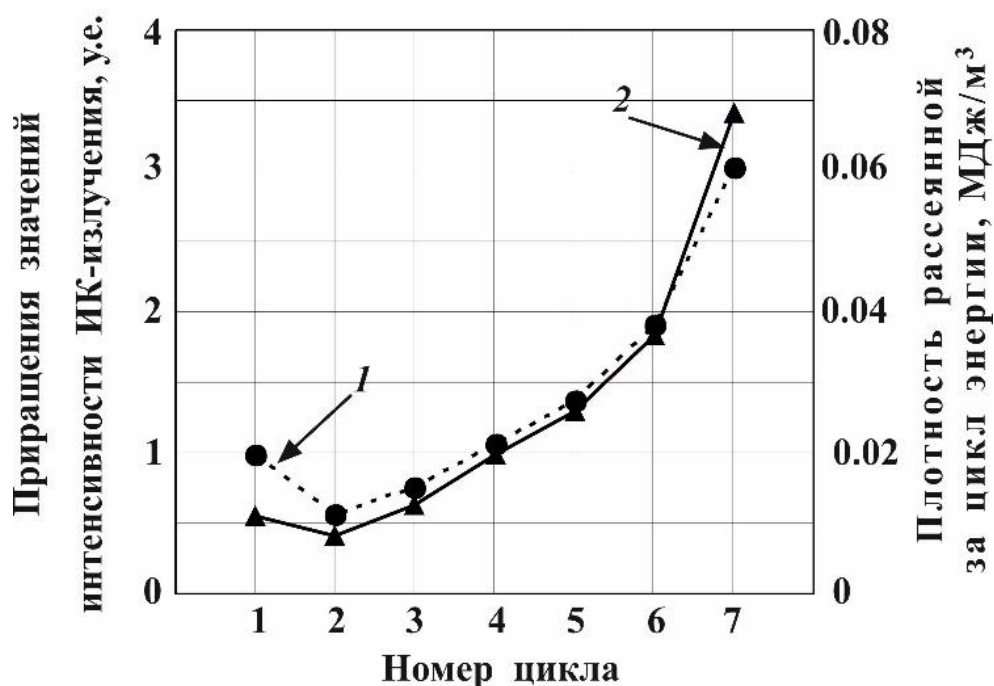


Рисунок 4.11 – Зависимости значений объемной плотности рассеянной за цикл энергии W_n (1) и приращений значений интенсивности теплового излучения ΔV_{W_n} (2) от номера цикла “нагружение – разгрузка” n

Представленные зависимости (Рисунок 4.11) имеют качественно тождественный вид. Видно, что рост значений W_n (для всех циклов с $n > 2$), обусловленный переходом процесса в нелинейную стадию, приводит к повышению температуры образца, т. е. возрастанию значений ΔV_{W_n} . Аналогичные зависимости,

иллюстрирующие эффект разогрева циклически деформируемых образцов горных пород, приведены в работе [264].

Подчеркнем, что упругое деформирование в рассматриваемом режиме нагружения и разгрузки давало бы, в соответствии с положениями теории термоупругости, нулевое приращение температуры за цикл, а значит, и отсутствие эффекта разогрева образца. В действительности на втором цикле, где характер траектории $\sigma(\varepsilon)$ наиболее близок к линейному, наблюдается уменьшение W_n и соответствующего значения ΔV_{w_n} .

Приведенная на Рисунке 4.12а зависимость интенсивности ИК-излучения от времени $V_w(t)$ позволяет детально отразить стадии изменения механического состояния циклически деформируемого образца [261].

Анализируя зависимость $V_w(t)$ (Рисунок 4.12а), можно видеть, что ее характер существенно меняется в достаточно четко фиксируемые моменты времени T_n ($n = 3 - 8$), соответствующие значениям напряжений, в которых на кривой $\sigma(t)$ (Рисунок 4.12б) фиксируется переход процесса деформирования из линейной в нелинейную стадию. Наиболее отчетливо трансформации зависимостей $V_w(t)$ и $\sigma(t)$ проявляются на последних циклах деформирования, предшествующих разрушению образца. В качестве примера рассмотрим на Рисунке 4.12в участок зависимости $V_w(t)$, соответствующий седьмому циклу деформирования. Здесь в интервале времени, соответствующем росту нагрузки, прямыми 1 и 2 выделены два линейных участка с различными углами наклона. При этом момент времени T_7 , в котором наблюдается резкое изменение наклона кривой $V_w(t)$ (Рисунок 4.12а), совпадает со значением момента времени, в котором фиксируется трансформация зависимости $\sigma(t)$ (Рисунок 4.12б). Учитывая сделанные при описании диаграммы $\sigma(\varepsilon)$ выводы, предположим, что изменение угла наклона $V_w(t)$ в рассматриваемом интервале времени указывает на переход процесса деформирования образца в нелинейную стадию. Аналогичное соответствие отмечено в [185], где описаны результаты терморadiационных измерений при циклическом деформировании пластичных композитных материалов.

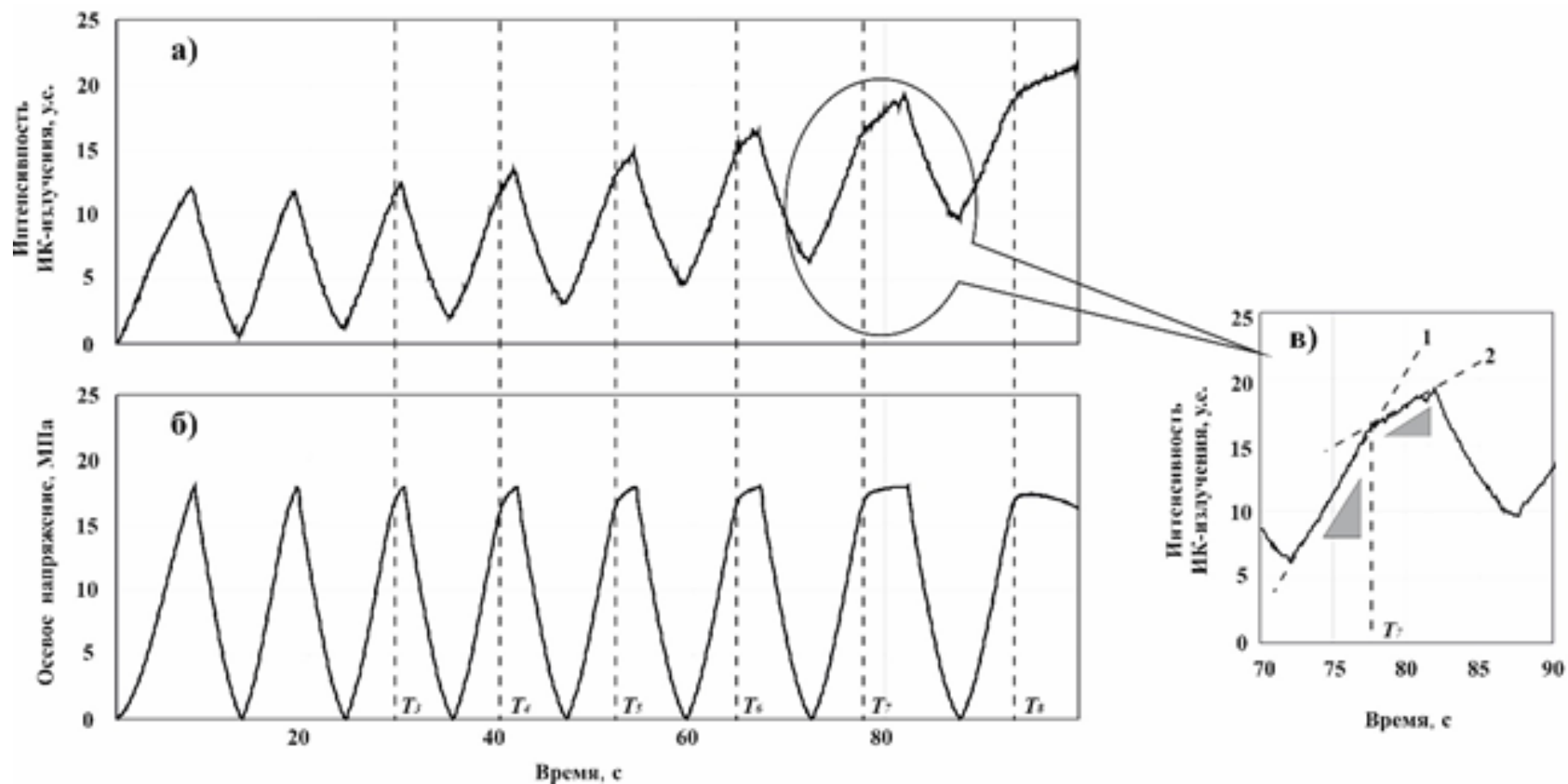


Рисунок 4.12 – Зависимости интенсивности ИК–излучения $V_w(t)$ (а) и осевого напряжения $\sigma(t)$ (б) с указанием моментов времени, соответствующих переходам деформирования образца в нелинейную стадию, и иллюстрации способа их определения (в)

Для подтверждения данного предположения рассмотрим зависимости $V_w(\sigma)$ (1) и $\varepsilon(\sigma)$ (2) для участка нагружения седьмого цикла (Рисунок 4.13) [261].

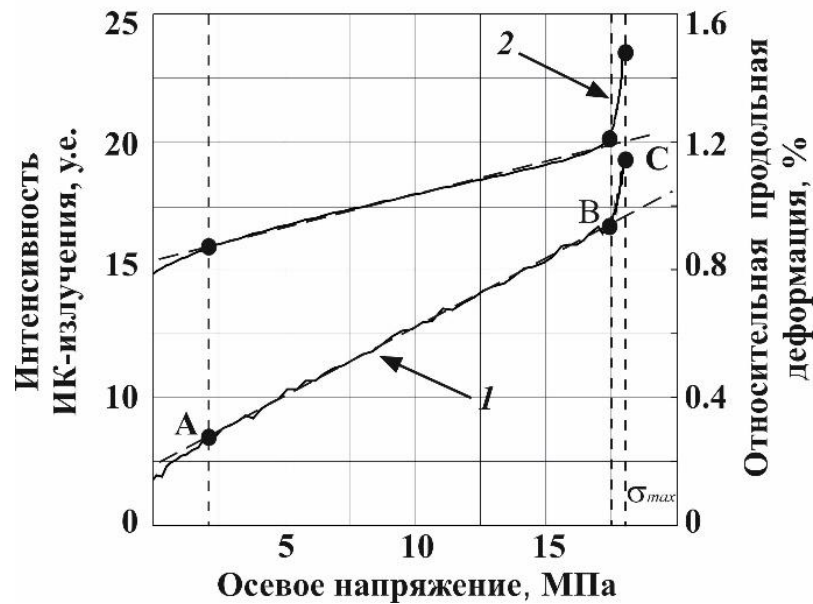


Рисунок 4.13 – Зависимости интенсивности ИК–излучения V_w (1) и относительной продольной деформации (2) от осевого напряжения σ , соответствующие этапу нагрузки на седьмом цикле деформирования образца

Зависимость $V_w(\sigma)$ достаточно точно аппроксимируется прямой при значениях σ , соответствующих упругому деформированию (участок AB). Существенное изменение характера зависимости $V_w(\sigma)$ наблюдается при приближении значений σ к σ_{max} . Здесь указанная зависимость приобретает явно нелинейный характер, обусловленный бóльшей скоростью повышения температуры образца, чем на предыдущем этапе деформирования. Такой характер зависимости $V_w(\sigma)$ объясняется тем, что на участке AB проявляется только “термоупругий”, а на участке BC еще и “термопластический” эффект. Аналогичным образом ведут себя зависимости $V_w(\sigma)$ на участках нагружения для всех циклов после второго. При этом длина участка ветви нагружения, в течение которого происходит нелинейное деформирование образца, увеличивается с номером цикла, что видно из диаграмм $\sigma(\varepsilon)$ на Рисунке 4.10.

На Рисунке 4.14 представлена зависимость интенсивности ИК–излучения $V_w(\varepsilon)$ от относительной продольной деформации, по которой визуально

фиксируются точки, где на каждом цикле изменяется ее наклон, т. е. происходит переход к нелинейной стадии процесса деформирования [261].

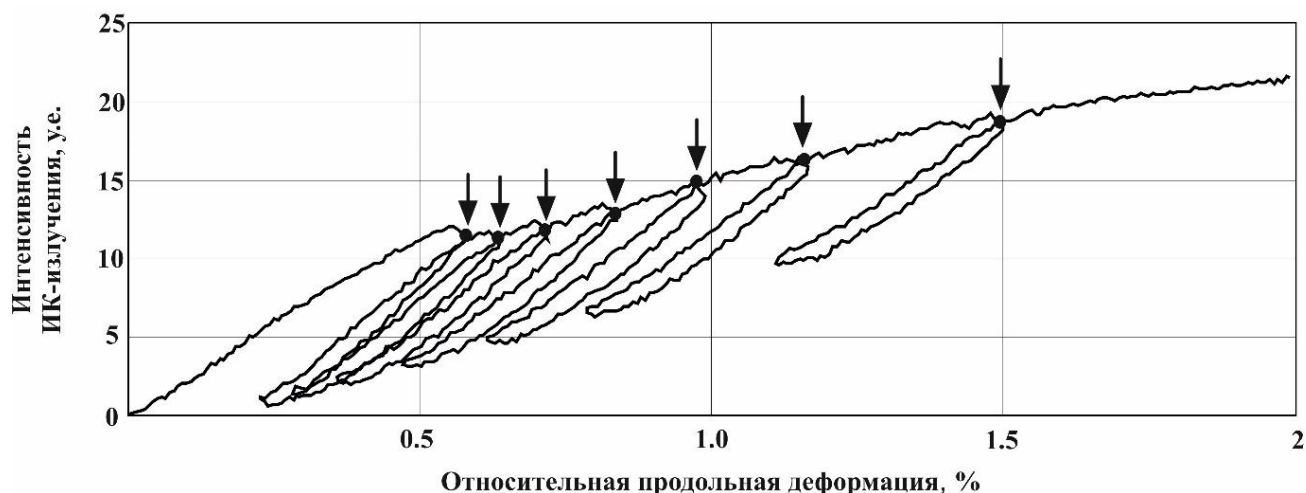


Рисунок 4.14 – Зависимость интенсивности ИК–излучения $V_w(\varepsilon)$ от относительной продольной деформации (стрелками указаны точки изменения наклона кривой на каждом цикле нагружения)

Для детализации и обоснования указанной причины трансформации кривых на Рисунке 4.15 для циклов с $n = 3 - 8$ приведены зависимости $\sigma(\varepsilon)$, характеризующие процесс деформирования в режиме нагружения, и соответствующие кривые $V_w(\varepsilon)$ [261].

Точки перегиба на кривых $V_w(\varepsilon)$ (показаны стрелками на Рисунке 4.15) и $\sigma(\varepsilon)$ определяются путем линейной аппроксимации их начальных участков (наклонные штриховые линии), при этом значения ε , соответствующие этим точкам для каждой пары графиков, оказываются практически совпадающими. Следовательно, зависимость $V_w(\varepsilon)$ так же, как зависимость $V_w(\sigma)$, позволяет достоверно идентифицировать моменты перехода материала из стадии упругого деформирования в неупругую.

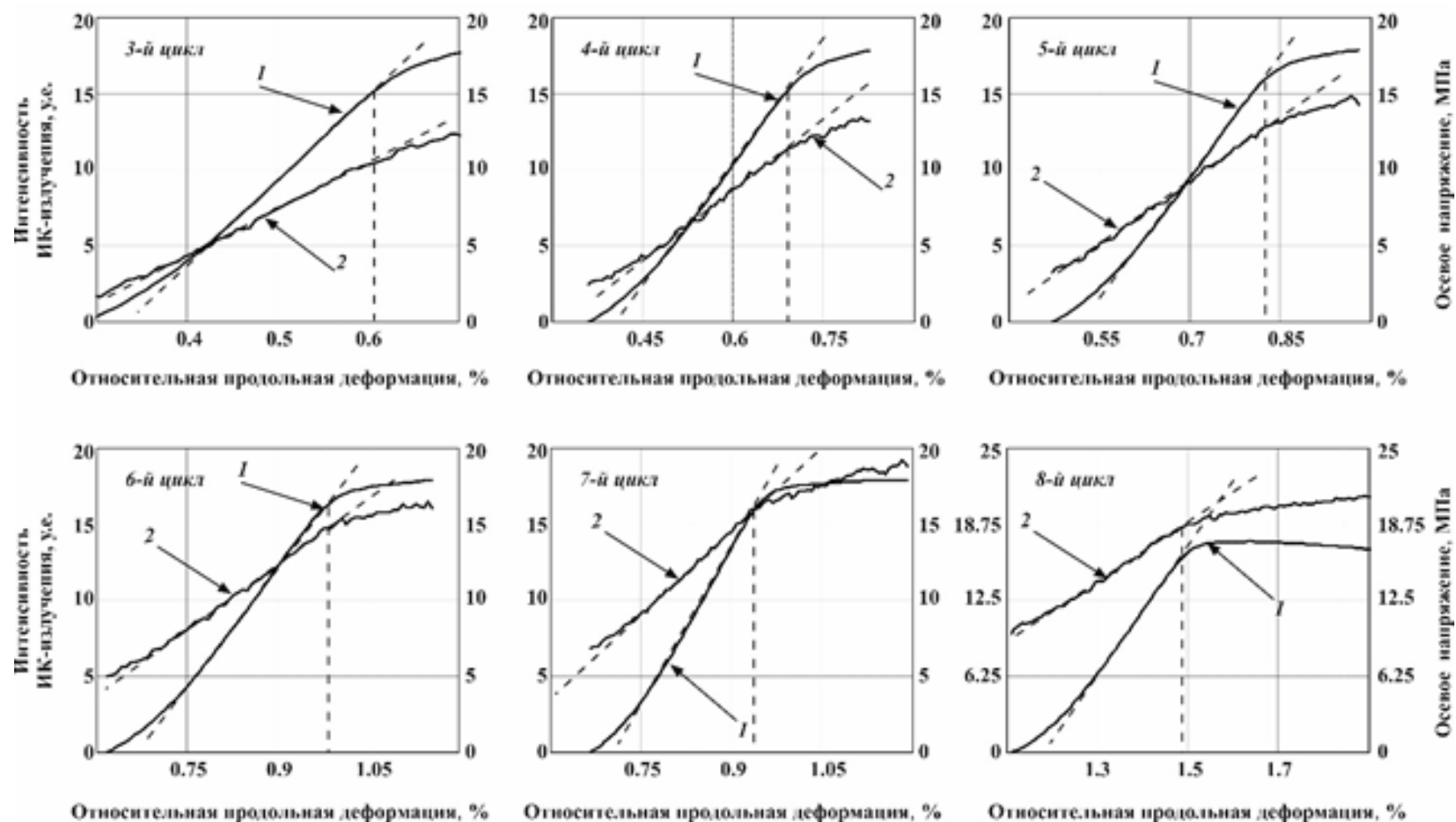


Рисунок 4.15 – Зависимости осевого напряжения $\sigma(\varepsilon)$ (1) интенсивности ИК-излучения $V_w(\varepsilon)$ (2) от относительной продольной деформации для участков нагружения, соответствующих циклам с $n = 3 - 8$

Далее представлены результаты экспериментов по регистрации параметров теплового излучения с поверхности образцов бетона ($d = 50$ мм и $h = 100$ мм) при их высокоамплитудном циклическом нагружении в условиях одноосного сжатия. На Рисунке 4.16а представлен общий вид экспериментального стенда, на котором проводились испытания образцов бетона, а на Рисунке 4.16б его принципиальная схема.

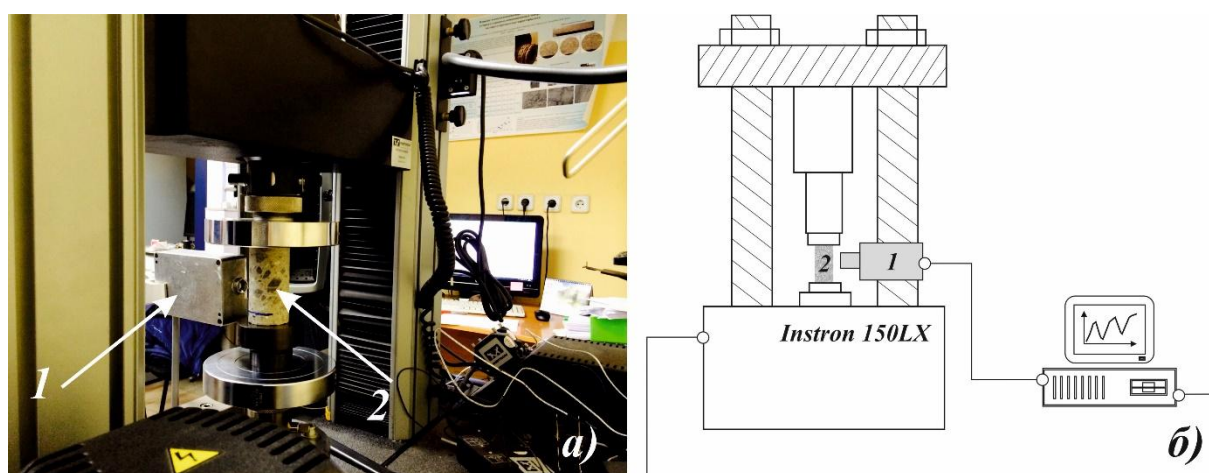


Рисунок 4.16 – Общий вид экспериментального стенда (а) и его принципиальная схема (б): 1 – ИК–радиометр; 2 – образец геоматериала

В описываемых экспериментах на каждом цикле «нагружение – разгрузка» нагрузка возрастала до значения, соответствующего $\sigma_{max} \approx 0,9\sigma_c$, после чего осуществлялась его разгрузка до значения, при котором $\sigma = \sigma_{min} \approx 0,1$ МПа. Значение σ_c принималось равным 32 МПа. Разрушение образца при указанной амплитуде изменения напряжений произошло на восьмом цикле. На Рисунке 4.17 приведены кривые изменения во времени осевого напряжения $\sigma(t)$, относительной продольной деформации и интенсивности ИК–излучения $V_w(t)$ при деформировании образца бетона в условиях последовательных циклов “нагружения – разгрузки” ($|d\varepsilon/dt| = const = 3,6$ мм/мин) при постоянном значении амплитуды нагрузки [262].

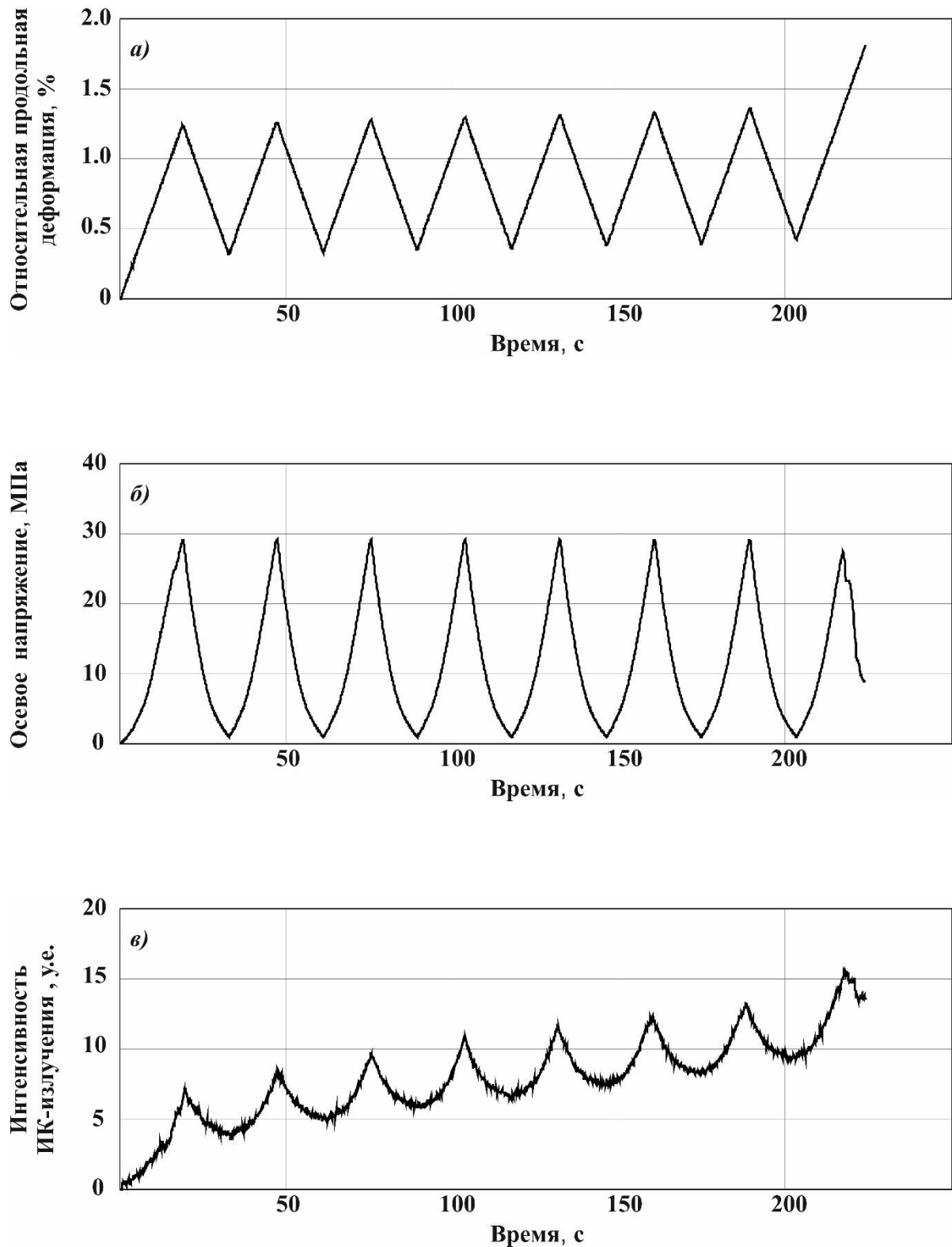


Рис. 4.17 – Зависимости относительной продольной деформации (а), осевого напряжения $\sigma(t)$ (б) и интенсивности ИК–излучения $V_w(t)$ (в) для образца бетона при испытании с $|d\varepsilon/dt| = \text{const} = 3,6$ мм/мин

На Рисунке 4.18а приведена диаграмма « $\sigma-\varepsilon$ » для образца бетона, результаты испытаний которого представлены на Рисунке 4.17, а на Рисунке 4.18б диаграмма « $\sigma-\varepsilon$ » для образца каменной соли результаты испытаний которого описывались выше (Рисунок 4.9) [261, 262].

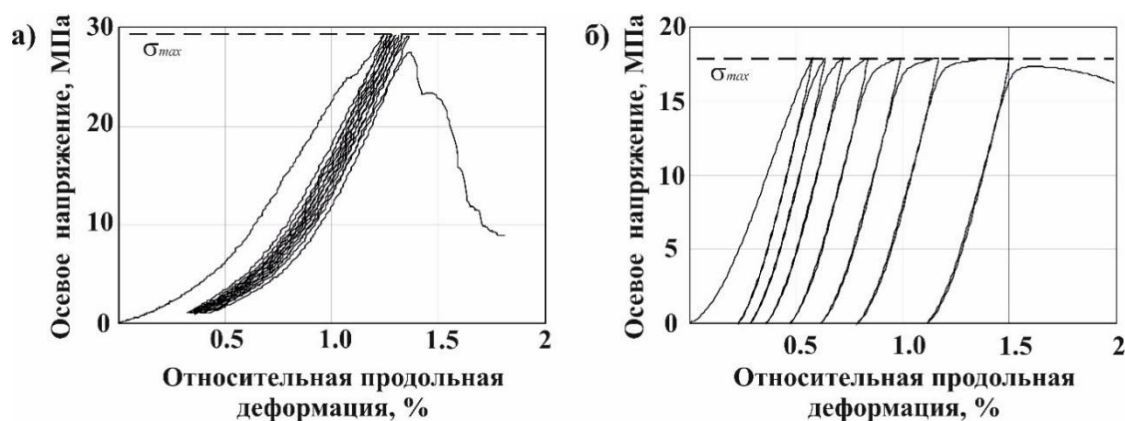


Рисунок 4.18 – Зависимости осевого напряжения $\sigma(\varepsilon)$ от относительной продольной деформации: *a* – для бетона; *б* – для каменной соли

Диаграммы « $\sigma-\varepsilon$ », полученные для бетона и каменной соли (рис. 4.18а и рис. 4.18б, соответственно), имеют стандартный вид и содержат особенности, характерные для диаграмм, описывающих подобный режим нагружения исследуемых геоматериалов [265, 266]. Ниже на рис. 4.19 показаны зависимости интенсивности ИК-излучения от относительной продольной деформации $V_w(\varepsilon)$ для рассматриваемых типов геоматериалов [261, 262].

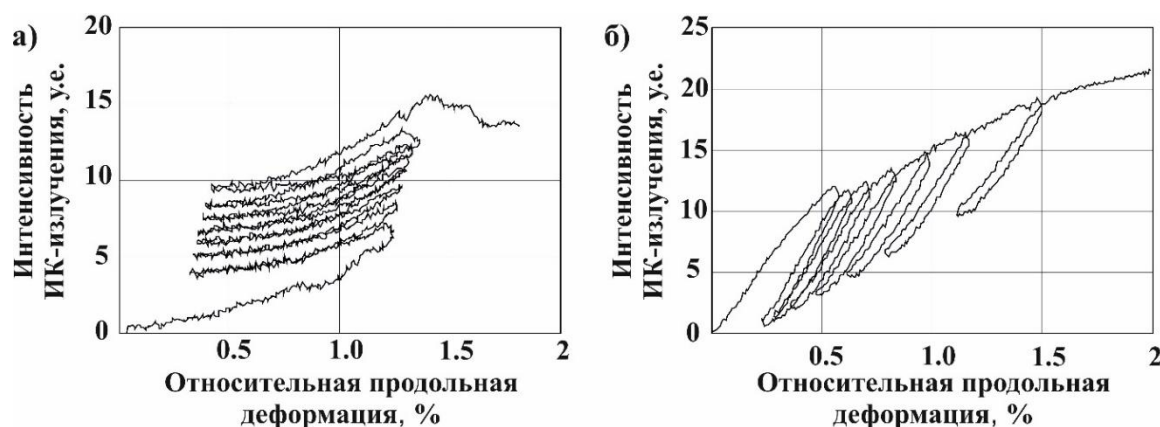


Рис. 4.19. Зависимости интенсивности ИК-излучения $V_w(\varepsilon)$ от относительной продольной деформации: *a* – для бетона; *б* – для каменной соли

Для исследования различий в характере кривых $V_w(\varepsilon)$ для каменной соли и бетона на Рисунках 4.20 и 4.21 приведены указанные зависимости, характеризующие процесс деформирования испытываемых геоматериалов на отдельных циклах “нагрузки – разгрузки” [262].

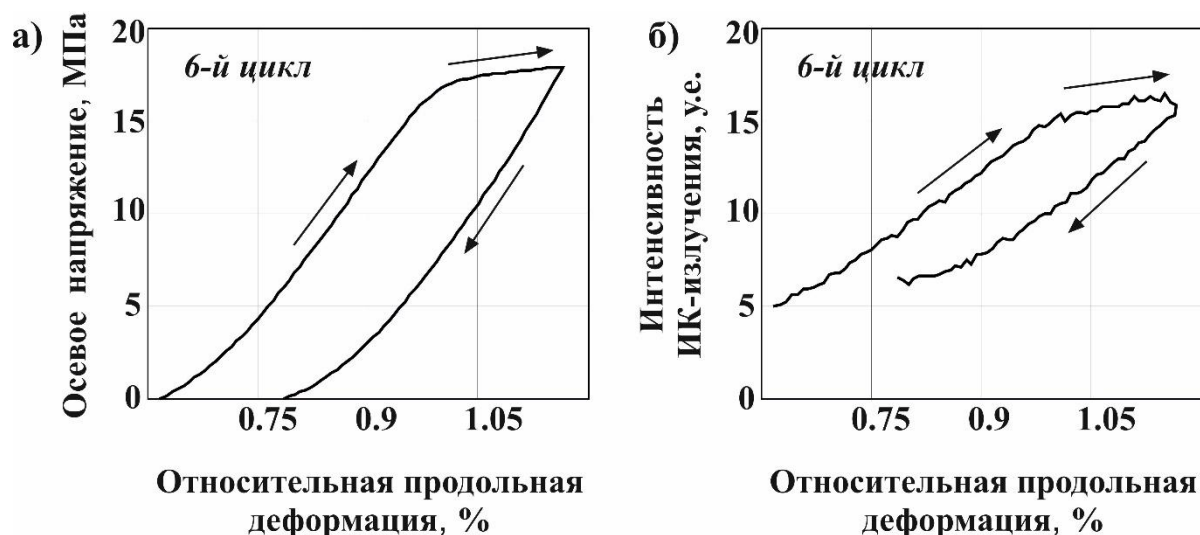


Рисунок 4.20 – Зависимости, соответствующие шестому циклу деформирования образца каменной соли: *a* – осевого напряжения $\sigma(\varepsilon)$ от относительной продольной деформации; *б* – интенсивности ИК–излучения $V_w(\varepsilon)$ от относительной продольной деформации

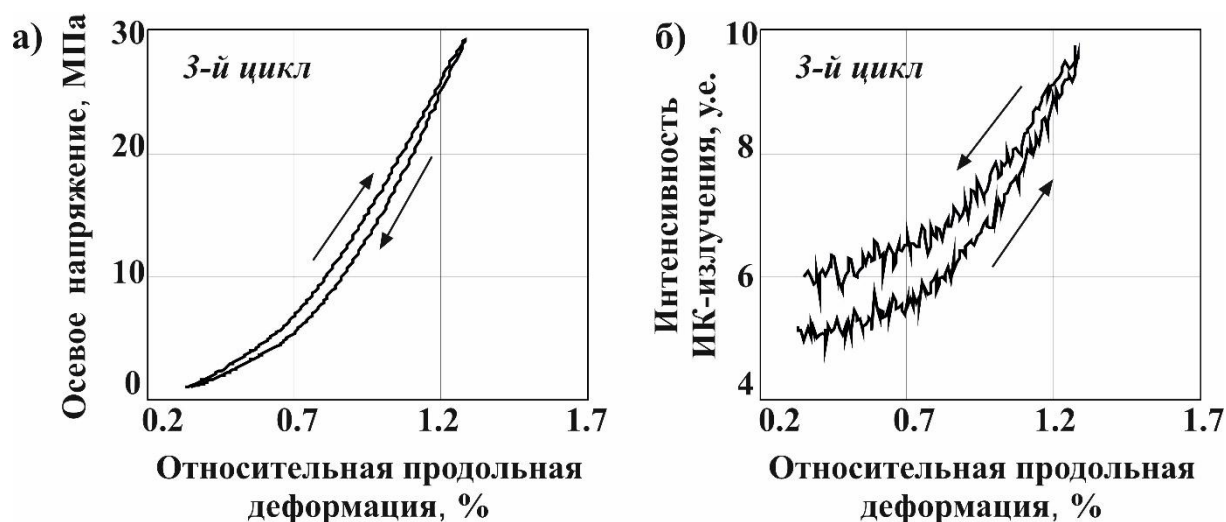


Рисунок 4.21 – Зависимости, соответствующие третьему циклу деформирования образца бетона: *a* – осевого напряжения $\sigma(\varepsilon)$ от относительной продольной деформации; *б* – интенсивности ИК–излучения $V_w(\varepsilon)$ от относительной продольной деформации

Как видно из Рисунка 4.20а, зависимости $\sigma(\varepsilon)$ деформирование образца каменной соли на этапе нагружения происходит по траектории более “медленной” по сравнению с траекторией, характеризующей этап разгрузки в этом же цикле. Указанный факт находит отражение (Рисунок 4.20б) в том, что “остывание” образца каменной соли осуществляется с большей скоростью, чем его “разогрев”, соответствующий участку нагружения. При этом наблюдается высокая идентичность зависимостей $\sigma(\varepsilon)$ и $V_w(\varepsilon)$. Аналогичные выводы можно сделать при анализе кривых $\sigma(\varepsilon)$ и $V_w(\varepsilon)$, построенных для остальных циклов деформирования образцов каменной соли.

Иначе соотносятся между собой зависимости $\sigma(\varepsilon)$ и $V_w(\varepsilon)$ для бетона. На графике $V_w(\varepsilon)$ (Рисунок 4.21б) в пределах участка, соответствующего этапу разгрузки, отчетливо фиксируются более высокие значения интенсивности ИК-излучения, а значит, и температуры, по сравнению с аналогичными значениями, полученными для тех же деформаций, но на участке нагружения. Такой характер графиков $V_w(\varepsilon)$ для бетона можно, по-видимому, объяснить известной особенностью деформирования бетонов, проявляющейся в том, что разгрузочная ветвь диаграммы $\sigma(\varepsilon)$ (Рисунок 4.21а) представляет собой более “выпуклую” кривую, чем кривая для участка “нагрузки”.

Таким образом, качественное сравнение зависимостей $\sigma(\varepsilon)$ и $V_w(\varepsilon)$, позволяет сделать вывод о возможности идентификации по данным терморadiационных измерений особенностей процессов деформирования в различных типах геоматериалов при их высокоамплитудном циклическом нагружении.

4.3 Экспериментальная оценка степени нарушенности образцов горных пород при высокоамплитудных циклических режимах нагружения в условиях одноосного сжатия по данным терморadiометрических измерений

В настоящее время одним из способов оценки поврежденности материалов является метод, основанный на зависимости жесткости материала от его нарушенности [271]. В простейшем случае дефектность материала характеризуется параметром D (поврежденностью), определяемым по формуле [271, 272]:

$$D = 1 - (E/E_0), \quad (4.7)$$

где E_0 – модуль упругости ненарушенного геоматериала, E – модуль упругости материала со структурными нарушениями. Поэтому, определив тангенс угла наклона соответствующих участков зависимостей $\sigma(\varepsilon)$ или $V_w(\varepsilon)$, мы можем получить зависимость жесткости испытываемого образца от номера цикла нагружения и тем самым проследить динамику нарушенности материала [183, 269].

На Рисунке 4.22а приведена зависимость модуля упругости E , определяемого в соответствии с российскими нормативными документами [273], от номера цикла нагружения, определяемая по графику $\sigma(\varepsilon)$, а на Рисунке 4.22б – зависимость коэффициента $k = \Delta V_w / \Delta \varepsilon$, определяемого аналогичным образом по графику $V_w(\varepsilon)$ [263].

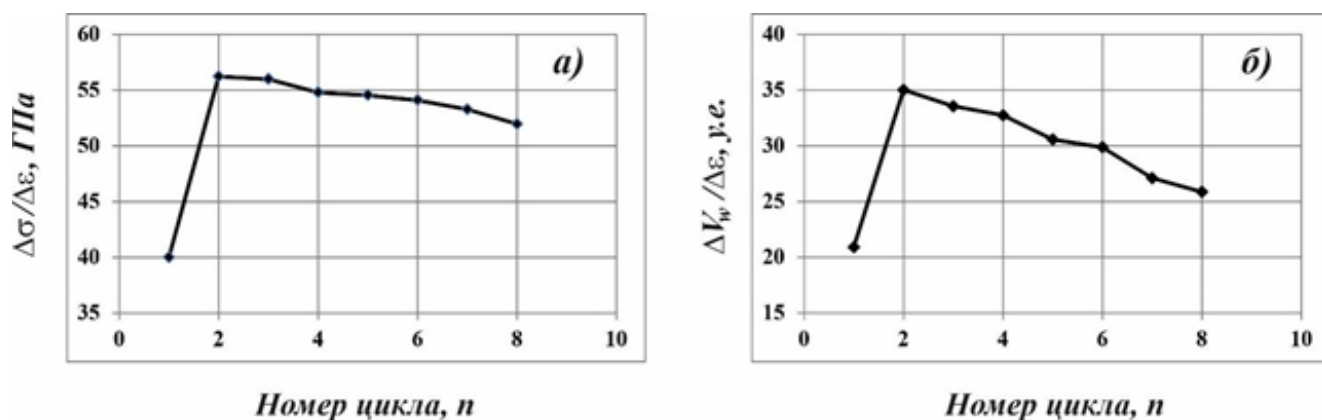


Рисунок 4.22 – Зависимости модуля упругости $E(n)$ (а) и коэффициента $k(n)$ (б) от номера цикла деформирования n

Как видно из Рисунка 4.22а, значение модуля E образца каменной соли возрастает после первого цикла деформирования, что связано с упрочнением материала. Далее зависимость $E(n)$ полого спадает с ростом номера n цикла «нагружение–разгрузка». Такое изменение деформационных свойств испытываемого образца вполне согласуется с данными многочисленных исследований усталостного поведения геоматериалов. Аналогично ведет себя и коэффициент $k = \Delta V_w / \Delta \varepsilon$, зависимость которого от номера цикла n представлена на Рисунке 4.22б.

Выявленная корреляция между модулем деформации E и коэффициентом $k = \Delta V_w / \Delta \varepsilon$, указывает на принципиальную возможность реализации использования данных бесконтактных терморadiометрических измерений для оценки степени поврежденности образцов геоматериалов, а в перспективе и породных массивов.

Выводы по Главе 4

1) Предложены алгоритмы обработки рядов данных, основанные на процедурах спектрального и вейвлет–анализов, особенностью которых является временная изменчивость частотных диапазонов полезной и шумовой составляющих анализируемых записей. Обоснована эффективность применения таких алгоритмов для идентификации изменений во времени по данным ИК–радиометрии параметров, характеризующих квазипериодические деформационные процессы в нагружаемых геоматериалах/

2) Показано, что стадии изменения напряженно–деформированного состояния образцов каменной соли при их высокоамплитудном циклическом нагружении идентифицируются по особенностям записей интенсивности ИК–излучения, обусловленным термомеханическими эффектами.

3) Переход между стадиями упругого и неупругого деформирования в пределах каждого цикла нагружения и разгрузки фиксируется по характерным точкам перегиба зависимостей интенсивности инфракрасного излучения от времени и от изменений осевого напряжения и относительной продольной деформации.

4) Показано, что значения введенного коэффициента $k = \Delta V_w / \Delta \varepsilon$, определяемого по зависимостям изменений интенсивности инфракрасного излучения от продольной деформации и являющегося аналогией модуля деформации E , уменьшаются с ростом номера n цикла «нагружение – разгрузка».

5) Таким образом, результаты, полученные в третьей и четвертой главах, доказывают, что анализ зависимостей интенсивности теплового излучения с поверхности породы от деформации с учетом физико-механических и теплофизических свойств позволяет оценивать степень нарушенности материала, что позволило сформулировать пятое научное положение:

«Доказано, что введенный коэффициент k , равный отношению изменений интенсивности ИК-излучения с поверхности породы и продольной деформации, фиксируемых при циклических нагрузках, позволяет оценивать степень нарушенности материала с учетом его физико–механических и теплофизических свойств, причем увеличение степени нарушенности характеризуется уменьшением значений данного коэффициента».

ГЛАВА 5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФРАКРАСНОЙ РАДИОМЕТРИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВОВ ГРУНТОВ И ГОРНЫХ ПОРОД

5.1. Экспериментальные исследования методом ИК–радиометрии изменений напряжений на поверхности забоя скважины в модели грунтового массива

Полученные на малых лабораторных образцах результаты позволили сделать вывод, что ИК–радиометрия может быть эффективно применена в системах обнаружения происходящих в породных массивах природных и техногенных механических процессов. Естественным продолжением этих исследований, направленным на расширение границ использования разрабатываемой методики применительно к условиям *in-situ*, является существенное увеличение геометрических размеров тестируемых областей. Ниже описываются эксперименты, в которых благодаря увеличению размеров области испытаний оказалось возможным моделировать в лабораторных условиях изменения напряженного состояния на забое скважины при изменении напряженного состояния во вмещающем грунтовом массиве [274 – 276].

Для знакопеременного нагружения объемов грунта был сконструирован лабораторный стенд (Рисунок 5.1), на котором благодаря увеличению размеров области испытаний можно устраивать в обследуемом объеме модельную скважину и выполнять измерения, дающие информацию о вариациях напряжений у ее забоя и внутри массива. При изменениях вертикальной нагрузки на установленный на поверхности объема штамп происходят изменения напряженного состояния грунта как во всем объеме, так и в окрестности скважины и на поверхности ее забоя.

В описываемых экспериментах испытуемый объем грунта подвергался чередующимся циклам нагружения и разгрузки. В экспериментах контрольные измерения вариаций горизонтальных напряжений в массиве вне зоны влияния скважины выполнялись с использованием тензодатчиков [66]. Соответствующие

им изменения напряженного состояния грунта на забое скважины регистрировались с помощью датчика ИК-излучения, который свободно подвешивается по оси скважины так, что его первичный преобразователь располагается на высоте ≈ 1 см от забоя.

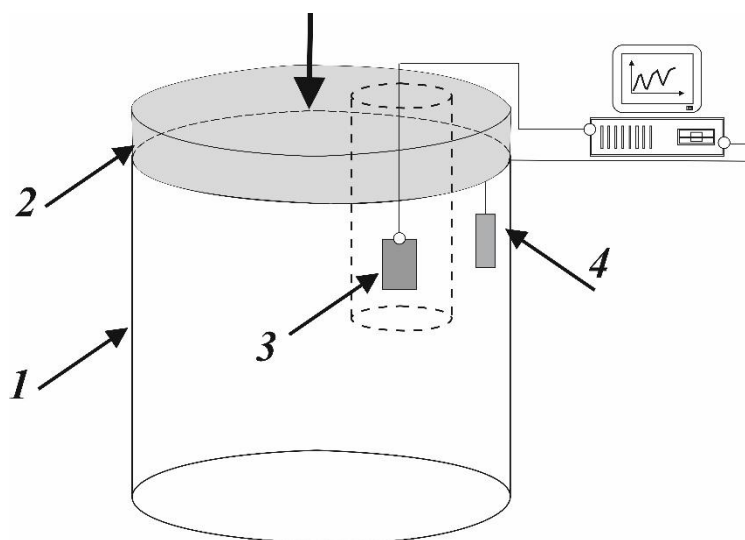


Рисунок 5.1 – Схема стенда для испытаний грунтового объема со «скважиной»:

1 – цилиндрический лоток; 2 – распределительный штамп;

7 – ИК-радиометр; 4 – тензодатчик

Характерные примеры модифицированных записей значений выходных сигналов, получаемых в результате прохождения первичных сигналов ИК – радиометра $V_w(t)$ и тензодатчика $V_\sigma(t)$ через измерительно-вычислительный тракт, показаны на Рисунке 5.2.

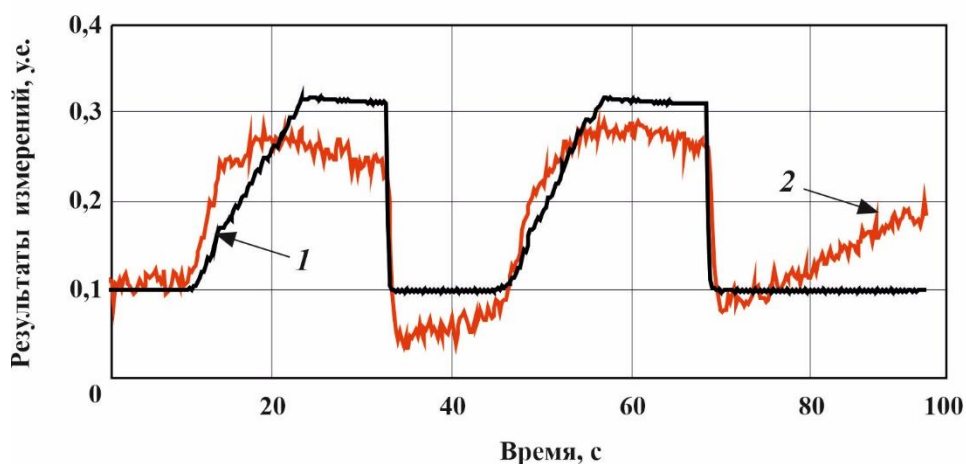


Рисунок 5.2 – Зависимости выходных сигналов тензометрии $V_\sigma(t)$ (1)

и ИК – радиометрии $V_w(t)$ (2) от времени

Метод конечных элементов (МКЭ) – один из наиболее широко применяемых подходов для решения задач механики сплошных сред. Его концептуальная основа состоит в том, что поведение целого физического тела исследуется через анализ характеристик его отдельных фрагментов – конечных элементов. В рамках современного подхода к анализу плоского напряжённого состояния в МКЭ используют треугольные элементы: для них определяют матрицу жёсткости и рассчитывают вектор узловых напряжений [277 – 279].

В современной практике проектирования горно–технических сооружений и оценки напряжённо–деформированного состояния массивов грунтов и горных пород программные комплексы, основанные на методах численного моделирования, занимают доминирующее положение [280, 281]. Программные комплексы (Ansys, Plaxis, Flac, ABAQUS и др.) обеспечивают возможность численного моделирования неоднородных породных массивов в 2D / 3D постановках. При этом в расчётных моделях, реализуемых в указанных программных комплексах, могут быть учтены ключевые физико–механические особенности среды: нелинейность деформирования, эффекты упрочнения и разупрочнения, а также ползучесть. Кроме того, такие вычислительные инструменты позволяют оценивать взаимное влияние вмещающего массива и крепи горных выработок, а также анализировать эволюцию параметров их напряжённо–деформированного состояния во времени с учетом неоднородности и изменчивости инженерно–геологических условий.

В рамках представленной работы изменения напряжений на забое «скважины» также были численно рассчитаны в программном комплексе COMSOL Multiphysics [280].

В численном эксперименте использовалась упругопластическая модель материала с критерием разрушения Кулона–Мора [22]. Граничные условия были заданы следующим образом: нижняя граница расчетной области имеет жесткое закрепление, боковые поверхности ограничены в направлении нормали к ним, при этом перемещения в вертикальном направлении допускаются. К верхней границе модели прикладывалось равномерно распределенное давление,

соответствующее значениям нагрузки эксперимента.

На Рисунке 5.3 представлен общий вид расчетной схемы описываемой численной модели.

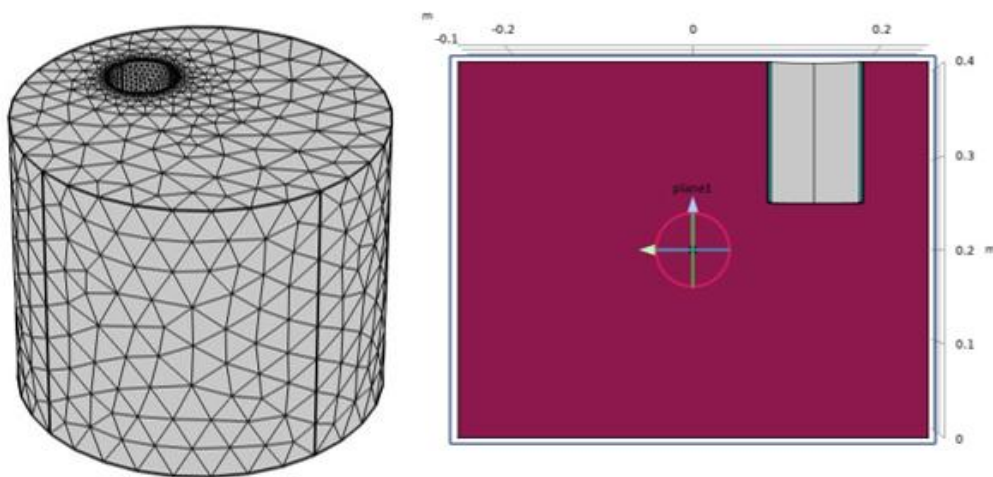


Рисунок 5.3 – Расчетная схема для численной оценки изменения напряжений на забое «скважины» (граничные условия описаны в тексте)

На Рисунке 5.4 представлен график изменений во времени тангенциальных напряжений на забое "скважины" $\tau(t)$, соответствующих режимам нагрузки, осуществлявшимся в лабораторном эксперименте.

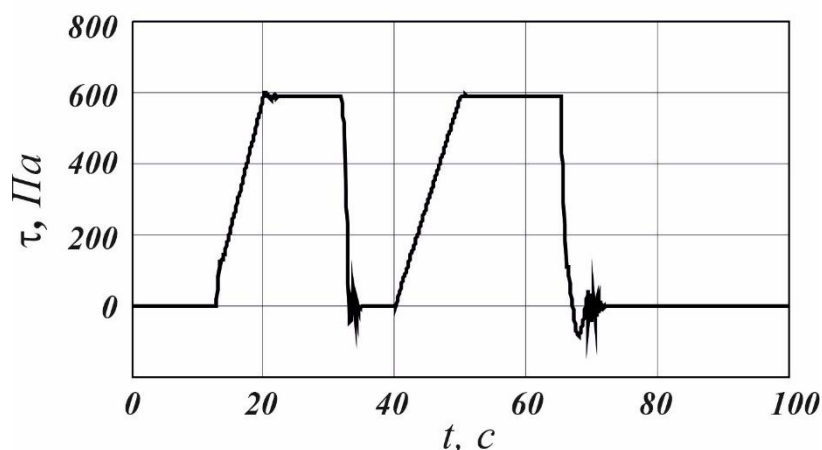


Рисунок 5.4 – График изменения тангенциальных напряжений на забое скважины $\tau(t)$ во времени

Выполненное визуальное сравнение графиков изменения во времени параметров напряженного состояния в призабойной зоне грунта, построенных по записям сигналов тензодатчиков и ИК–радиометра, а также результаты модельного

расчета демонстрируют возможность оценки временных изменений напряжений в грунтовом массиве по данным терморадиометрии.

Для получения информации о параметрах быстропротекающих механических процессов в массиве в последующих экспериментах был сделан акцент на обоснование принципиальной возможности ИК – диагностики волновых возмущений в околоскважинном пространстве, инициируемых ударной нагрузкой.

На описываемой экспериментальной установке моделировалось прохождение волнового возмущения в зоне массива. Генерация кратковременного волнового импульса в массиве обеспечивалась мгновенным воздействием на боковую поверхность цилиндрического лотка, инициированного ударным устройством. Приложение внешней ударной нагрузки вызывает изменения напряженного состояния как во всем объеме модели, так и в окрестности скважины, и на поверхности ее забоя. Схемы регистрации изменений напряженного состояния грунта на забое скважины в данных опытах аналогичны описанным выше.

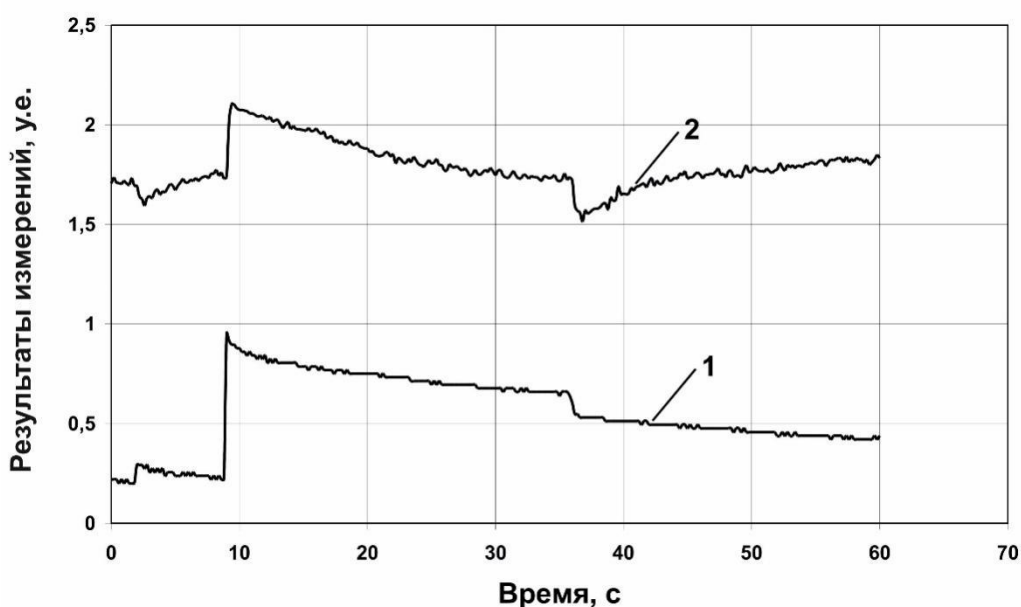


Рисунок 5.5 – Экспериментальные результаты измерений выходных сигналов тензометрии $V_{\sigma}(t)$ (1) и ИК–радиометрии $V_w(t)$ (2)

В качестве примера на Рисунке 5.5 приведены графики зависимостей $V_{\sigma}(t)$ и $V_w(t)$, отражающие реакцию исследуемой среды на нестационарное ударное воздействие в условиях одноосного сжатия.

На графиках Рисунка 5.5. вполне четко фиксируются начало и конец зоны нестационарности сигнала. Видно, что рассматриваемые возмущения затухают в течение короткого отрезка времени. Изменения во времени записей сигналов тензометрического элемента и ИК–радиометра в этой зоне идентичны по виду и отражают «отклик» изменений напряжений на забое скважины на изменения нагрузки во времени.

Упругое поведение напряжений внутри объема грунтового массива вне зоны влияния скважины вполне очевидно, так как вертикальные и горизонтальные напряжения примерно одинаковые, напряженное состояние близко к условиям всестороннего сжатия, при котором даже сыпучий материал не разрушается. С другой стороны, представляется правильным предположение, что при данном устройстве модельной скважины в случае циклических изменений напряжений на ее забое грунт, наоборот, должен терять свою сплошность, т. е. разрушаться, рассыпаться. При таком предположении изменение во времени регистрируемой интенсивности теплового излучения с поверхности забоя должно было иметь вид монотонной возрастающей функции. Однако визуально прослеживаемое (Рисунок 5.5) подобие сигнала с ИК–радиометра $V_w(t)$ функциям $V_\sigma(t)$ в интервалах, где существенно изменяются значения $V_\sigma(t)$ и, следовательно, возрастает или убывает нагрузка, можно объяснить только предположением об упругом характере изменений напряжений на забое скважины.

Таким образом, на больших объемах грунтов показана возможность достоверного определения качественных (моменты изменений напряженного состояния массива) и количественных (знаки и скачки) параметров процесса ударных изменений напряжений во времени на основе бесконтактных ИК–измерений. С физической точки зрения полученные результаты показывают, что процесс деформирования внутри образца указанных размеров с достаточной точностью можно считать адиабатическим, т.е. в условиях, моделирующих реальные измерения в массиве, выполняется основная физическая предпосылка эффективности ИК–диагностики.

Проведенные исследования показывают применимость разрабатываемой

методики для идентификации волновых процессов в грунтовых массивах. Практическое применение ИК–радиометрии для полевых измерений вариаций напряженного состояния массивов грунтов может существенно расширить возможности экспериментальных наблюдений за происходящими в них динамическими и сейсмическими процессами, стать существенно информативным дополнением к традиционно используемым геофизическим методам оценки изменений их напряженного состояния.

5.2. Фиксация изменений «быстропротекающих» изменений напряженного состояния «крупномасштабного» образца, моделирующего массив горной породы

Также был сконструирован лабораторный стенд (Рисунок 5.6) для проведения испытаний при знакопеременном нагружении большого объёма бетона (порядка 0,6 м³), имитирующего скальную породу.

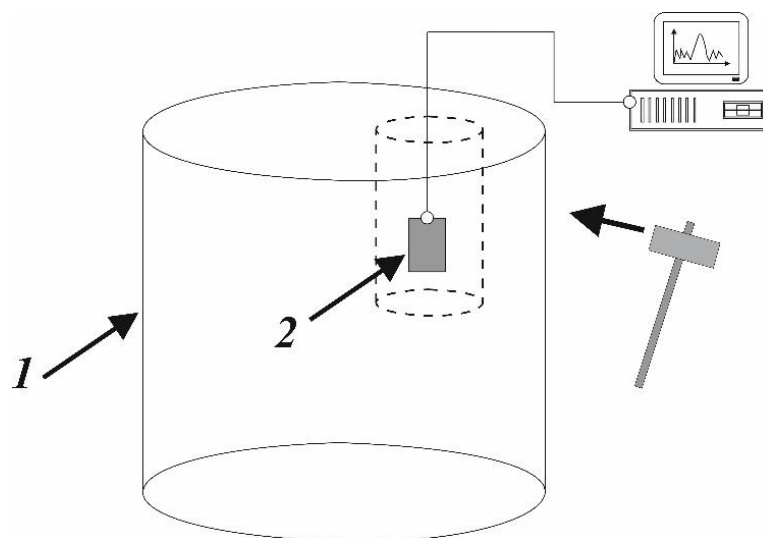


Рисунок 5.6 – Схема стенда для испытаний «массива» геоматериала (бетона) со «скважиной»

1 – цилиндрический лоток с бетонной массой; 2 – ИК–радиометр

Ключевым элементом стенда выступает бетонный цилиндр со стальной опалубкой, характеризующийся следующими геометрическими параметрами: внутренний диаметр – 800 мм, высота – 1200 мм. На расстоянии 250 мм от

центральной оси цилиндра пробурена скважина с диаметром 100 мм и глубиной 400 мм, предназначенная для размещения ИК–радиометра.

В ходе экспериментов моделировалось распространение сейсмоакустической волны в локальной зоне породного массива. Образец, имитирующий объём горной породы, подвергался кратковременному ударному воздействию, при котором искусственно вызванные изменения напряжений затухали за короткий промежуток времени. Внешняя ударная нагрузка приводила к изменению напряжённого состояния как во всём объёме образца, так и в окрестности скважины, включая поверхность её забоя. Кратковременный волновой импульс в объёме образца генерировался посредством «мгновенного» ударного воздействия (Рисунок 5.6).

В ходе экспериментов фиксация изменений напряжённого состояния горной породы на забое скважины осуществлялась посредством ИК–радиометра. Прибор свободно подвешивался вдоль оси скважины таким образом, чтобы его первичный преобразователь находился на расстоянии ≈ 1 см от забоя (Рисунок 5.6). На Рисунке 5.7 представлен характерный пример записи выходного сигнала ИК–радиометра $V_w(t)$.

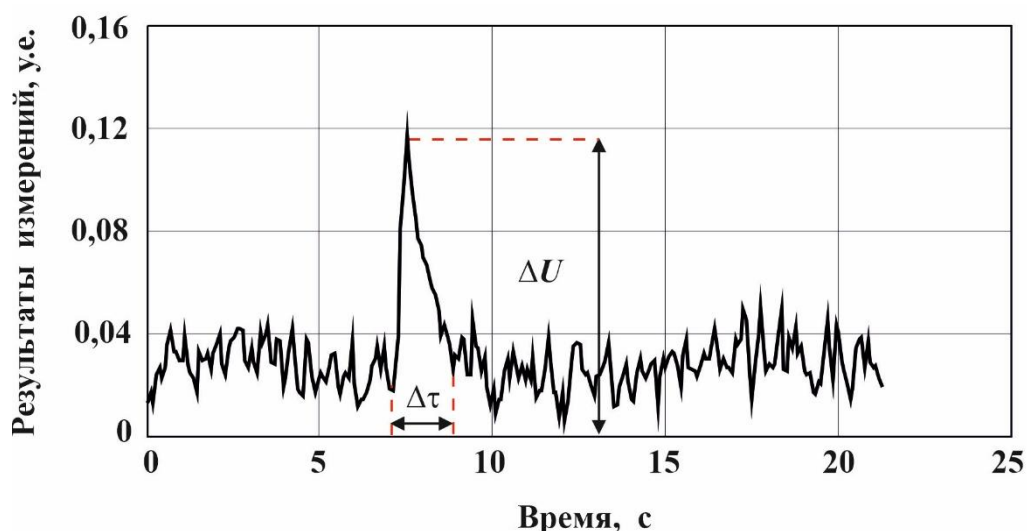


Рисунок 5.7 – Пример записи выходного сигнала ИК–радиометра $V_w(t)$ при моделировании ударного воздействия на массив скальной породы

На приведенном графике вполне четко фиксируются начало и конец зоны существенной нестационарности сигнала (Рисунок 5.7). Запись сигнала в этой зоне

очевидно отражает «отклик» вариаций напряжений на забое «скважины» на изменения нагрузки во времени, причем длительность нестационарного отклика среды в этом случае составляет $\Delta t \approx 2$ с.

Таким образом, на «больших» объемах геоматериалов показана возможность достоверного определения качественных (моменты изменений напряженного состояния «массива») и количественных (знаки и величины скачков) параметров процесса изменений напряжений во времени на основе бесконтактных ИК–измерений.

Проведенные исследования, показывающие эффективность предлагаемого подхода, представляют интерес в связи тем, что практическое применение ИК–радиометрии для полевых измерений вариаций напряженного состояния массивов грунтов и горных пород может существенно расширить возможности экспериментальных наблюдений за происходящими в них динамическими и сейсмическими процессами, стать содержательным дополнением к традиционно используемым геофизическим методам оценки изменений их напряженного состояния.

5.3 Методика оценки геомеханического состояния локальных участков породного массива на основе мониторинга его теплового поля

На основе приведенных в Главе 5 результатов исследований разработана «Методика оценки геомеханического состояния локальных участков породного массива на основе мониторинга его теплового поля».

Методика распространяется на горные выработки и элементы строительных конструкций подземных сооружений и регламентирует проведение мониторинга изменений во времени напряженно – деформированного состояния указанных объектов с использованием средств бесконтактной терморadiометрической диагностики (ИК–радиометров), размещаемых в измерительных скважинах.

Для проведения измерений оборудуются измерительные станции. Станции должны располагаться в заранее определенных местах, соответствующих участкам

породного массива с повышенной активизацией динамических проявлений горного давления. Организация измерительной станции для проведения измерений включает в себя бурение одного шпура диаметром 100 – 110 мм перпендикулярно стенке выработки. Глубина шпура определяется с учетом требуемой глубины проведения измерений.

При проведении испытаний в шпуре закрепляются специально изготовленные металлические держатели для кабеля, протягивается кабель, размещается ИК-радиометр, устройства передачи информации и прочее оборудование, необходимое для проведения испытаний. Общая схема проведения терморadiометрических измерений на участке породного массива представлена на Рисунке 5.8.

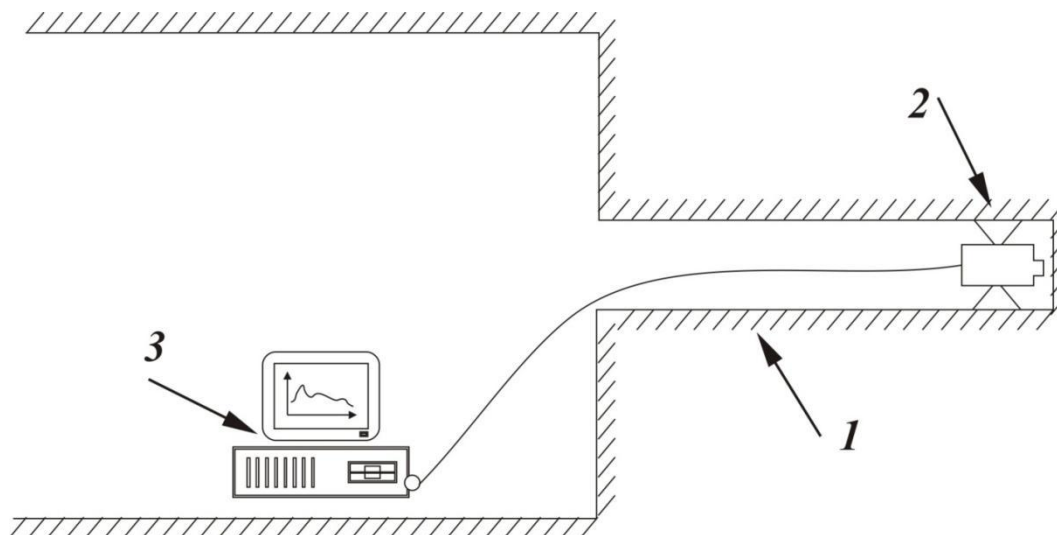


Рисунок 5.8 – Общая схема проведения терморadiометрических измерений

1 – шпур; 2 – ИК–радиометр с фиксирующими устройствами;

3 – регистрирующее устройство.

Перед проведением непосредственных измерений в породном массиве проводится тарировка изменений показаний ИК–радиометра по изменениям напряжений в образце, отобранном из обследуемого участка горной выработки. Для этого с использованием прессового оборудования проводятся серии по одноосному деформированию образцов горной породы, отобранных на обследуемом участке породного массива, с совместной регистрацией изменений

нагрузки и параметров термоэмиссии. К образцу прикладывается ступенчатая нагрузка с постоянным приращением ΔP_i , пересчитываемая в изменения первого инварианта напряжений в нем $\Delta \Pi_i = \Delta P_i / S$. При этом для каждого ΔP_i измеряются «скачки» уровней выходных сигнала (В) терморadiационного зонда ΔU_i . Затем строится график тарировочной зависимости $\Delta U(\Delta \Pi)$, по которому оценивается значение коэффициента пропорциональности между изменениями значений выходных сигналов терморadiометрического зонда и изменениям напряжений в образце A (В / Па). Пример тарировочной зависимости, полученной при испытаниях образца мрамора, представлен на Рисунке 5.9.

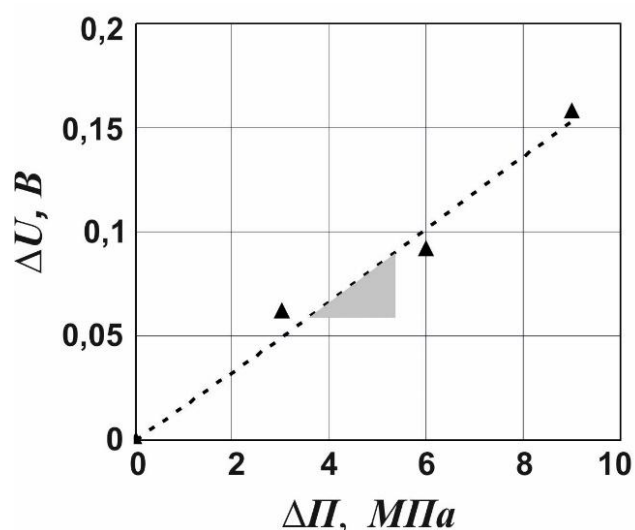


Рисунок 5.9 – Пример тарировочной зависимости $\Delta U(\Delta \Pi)$

При предварительной обработке результатов измерений учитывается наличие в полученных временных зависимостях как низкочастотных, так и высокочастотных составляющих. Низкочастотные составляющие в составе регистрируемой записи, в свою очередь, могут характеризовать как отклики на происходящие в массиве геомеханические процессы, так и процессы, обусловленные теплообменом. Однако размещение датчика – зонда у забоя шпура предполагает «квазиadiaбатичность» режима проведения терморadiометрических измерений, что позволяет связать низкочастотную составляющую именно с изменениями напряжений на обследуемом локальном участке массива. Такие низкочастотные составляющие $\Delta U_w(t)$ функции $\Delta U(t)$ выделяются с

использованием алгоритмов "скользящего" среднего. Выбор окна «скользящего среднего» обосновывается скоростью протекания предполагаемых изменений напряженного состояния.

При дальнейшем анализе данных измерений вместо $\Delta U(t)$ рассматривается функция $\Delta U_w(t)$.

Следующий этап обработки данных терморadiометрических измерений заключается в количественной оценке приращений напряжений $\Delta \Pi(t)$ по вариациям функций $\Delta U_w(t)$ по формуле (2).

Значимые изменения $\Delta U_w(t)$ (превышающие в 2 и более раза амплитуду шумовых (высочастотных) составляющих функции $\Delta U(t)$) за малый отрезок времени $\Delta t \leq 1..5$ пересчитываются в изменения первого инварианта напряжений $\Delta \Pi$, действующих на поверхности забоя шпура, на которую направлен ИК-радиометр, по формуле:

$$\Delta \Pi = (\Delta U_w(t + \Delta t) - \Delta U_w(t)) / A. \quad (5.1)$$

Значение коэффициента A определяется путем проведения описанных выше тарировочных опытов.

Результаты измерений представляют в виде графиков зависимости $\Delta \Pi(t)$. На Рисунке 5.10 представлен график приращения первого инварианта $\Delta \Pi(t)$, полученный путем соответствующей обработки сигнала $\Delta U(t)$ (Рисунок 5.7).

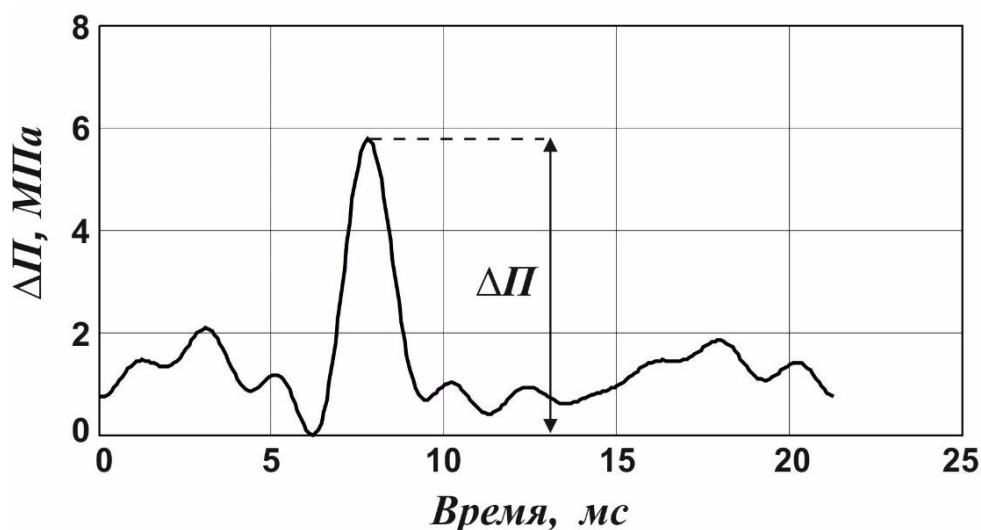


Рисунок 5.10 – Оценка приращения первого инварианта напряжений $\Delta\Pi(t)$ по данным терморадиометрии

ИК – измерения позволяют оценивать вариации только первого инварианта тензора напряжений, что является существенным ограничением возможностей методики. Кроме того, измерения выполняются на поверхности элементарного объема обследуемого породного массива, размеры которого определяются геометрией используемого терморадиометрического элемента. Однако, так как задание суммы главных напряжений Π в точке границы часто равносильно полному заданию тензора напряжений в этой точке, информация о $\Delta\Pi(t)$ в некоторой характерной точке на поверхности обследуемого объекта – существенная информация при решении некоторых «обратных» задач, позволяющая при определенных схемах оценивать полную картину изменений напряжений в представляющей интерес области. Например, используя решение известной задачи теории упругости о напряжениях на торце полубесконечной цилиндрической полости в упругом пространстве и определив временную зависимость $\Delta\Pi(t)$ на забое скважины в массиве, можно (в принимаемых чаще всего в прикладной геомеханике предположениях о связи горизонтальных и вертикальных напряжений «на бесконечности» через коэффициент бокового давления), оценить изменения напряженного состояния в окрестности этого забоя.

Выводы по Главе 5

1) Разработан стенд для знакопеременного нагружения модели породного массива со скважиной, позволяющий регистрировать изменения во времени напряженного состояния в ее призабойной зоне с помощью синхронных записей сигналов ИК-радиометра и установленных внутри нагружаемого объема тензометрических элементов. Подтверждена достоверность оценки временных изменений напряжений в породном массиве по данным терморadiометрии.

2) Разработана «Методика оценки геомеханического состояния локальных участков породного массива на основе мониторинга его теплового поля», рассмотренная и принятая к практической реализации в АО "ТРИАДА – ХОЛДИНГ", ООО «УСМ – ИНЖИНИРИНГ» и ООО «Управляющая компания «Талдинская».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является законченной научно–квалификационной работой, в которой на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований обоснованы новые научно-технические решения по разработке методов и технических средств, обеспечивающих использование бесконтактных терморadiометрических измерений для диагностики изменений напряженного состояния породных массивов, что вносит значительный вклад в повышение безопасности горного производства и подземного строительства.

Основные результаты работы, выводы и рекомендации, полученные при выполнении исследований, заключаются в следующем:

1. Выполнен анализ методов контроля напряжённо-деформированного состояния породного массива — в том числе подходов, опирающихся на эффекты разной физической природы (акустические, электромагнитные, радиационные и др.). Установлена актуальность разработки нового метода контроля геомеханического состояния массива на базе изучения термоэмиссионных эффектов, проявляющихся при нагружении горных пород, а также создания соответствующего методического и аппаратного обеспечения.

2. Разработан стенд для испытаний образцов горных пород в различных режимах одноосного сжатия, позволяющий осуществлять одновременную регистрацию механических, акустоэмиссионных и термоэмиссионных параметров при нагружении образцов.

3. Проведено теоретическое исследование изменения температуры гетерогенной среды с хаотически ориентированными трещинами в зависимости от ее напряженно–деформированного состояния, позволившее установить, что в такой среде при воздействии нагрузок, не превышающих 20% от разрушающих, указанные изменения температур имеют порядок 10^{-2} К.

4. Проведено экспериментальное исследование параметров проявления термоэмиссионных эффектов при нагружении образцов геоматериалов различных

типов, позволившее установить существенное влияние структурных особенностей, физико–механических и теплофизических свойств горных пород, а также скорости приложения внешней механической нагрузки на характер изменений сопутствующего ИК-излучения.

5. Предложены алгоритмы обработки рядов данных, основанные на процедурах спектрального и вейвлет–анализов, особенностью которых является временная изменчивость частотных диапазонов полезной и шумовой составляющих анализируемых записей. Обоснована эффективность применения таких алгоритмов для идентификации изменений во времени по данным ИК–радиометрии параметров, характеризующих квазипериодические деформационные процессы в нагружаемых геоматериалах.

6. Проведены экспериментальные исследования оценки влияния степени влагонасыщения на параметры теплового излучения нагружаемых горных пород. Предложена схема теоретического оценочного расчета приращений температуры «сухих» и «водонасыщенных» образцов горных пород, подвергаемых одноосному сжатию. Продемонстрирована высокая степень сходимости результатов такого расчета с данными экспериментальных наблюдений.

7. Установлены диаметрально противоположные характеры реакции изменений параметров акустоэмиссионных и термоэмиссионных процессов при испытаниях образцов горных пород на одноосное сжатие на скорость приложения нагрузки., что обосновывает необходимость комплексирования измерений параметров таких излучений для повышения надежности оценки изменений напряженно–деформированного состояния породных массивов.

8. Установлена возможность фиксации по данным бесконтактных терморадиометрических измерений проявлений так называемого «эффекта памяти», наблюдаемого при испытаниях с возрастающей от цикла к циклу амплитудой нагрузки.

9. Разработан стенд для знакопеременного нагружения модели породного массива со скважиной, позволяющий регистрировать изменения во времени напряженного состояния в ее призабойной зоне с помощью синхронных записей

сигналов ИК–радиометра и установленных внутри нагружаемого объема тензометрических элементов. Подтверждена достоверность оценки временных изменений напряжений в породном массиве по данным терморадиометрии.

10. Предложен метод контроля параметров напряженно–деформированного состояния массива на основе термомехнических эффектов в массивах геоматериалов, и разработано методическое и аппаратное обеспечение для его реализации.

11. Разработана «Методика оценки геомеханического состояния локальных участков породного массива на основе мониторинга его теплового поля», рассмотренная и принятая к практической реализации в АО "ТРИАДА – ХОЛДИНГ", ООО «УСМ – ИНЖИНИРИНГ» и ООО «Управляющая компания «Талдинская».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барях А.А., Губанова Е.А., Девятков С.Ю. Влияние горнотехнических факторов на развитие процесса оседания земной поверхности // Устойчивое развитие горных территорий. – 2025. – Т. 17. – № 4(66). – С. 2033 – 2042.
2. Захаров В.Н., Шляпин А.В., Трофимов В.А., Филиппов Ю.А. Изменение напряженно–деформированного состояния углепородного массива при отработке угольного пласта // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 9. – С. 5 – 24.
3. Лаптев Б.В. Историография аварий при разработке соляных месторождений // Безопасность труда в промышленности. – 2011. – № 12. – С. 41 – 46.
4. Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. – М.: Агентство экономических новостей, 1999. – 220 с.
5. Одинцев В.Н., Милетенко Н.А. Влияние геодинамических условий на взаимодействие техногенных геомеханических и гидрогеологических процессов при разработке месторождений твердых полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № S1. – С. 247 – 259.
6. Антоновская Г.Н., Капустян Н.К., Басакина И.М. Сейсмометрические методы прогноза ударных и вибрационных воздействий на проектируемые или реконструируемые здания // Геотехнические проблемы мегаполисов. Т. 5. М.: ПИ «Геореконструкция». – 2010. – С. 1719 – 1727.
7. Разводовский Д.Е., Федоровский В.Г., Шейнин В.И., Колыбин И.В. Особенности проектирования оснований, фундаментов и конструкций подземных частей высотных зданий и сооружений // Российская архитектурно-строительная энциклопедия. Том 13. – Москва: Всесоюзный научно-исследовательский институт проблем научно-технического прогресса и информации в строительстве, 2010. – С. 327 – 336.
8. Шейдеггер А. Е. Физические аспекты природных катастроф. Пер. с англ. А. А. Варги. – М.: Недра, 1981. – 232 с.

9. Вознесенский Е.А. Динамическая неустойчивость грунтов. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 264 с.
10. Гудман Р. Механика скальных пород. – М.: Стройиздат, 1987 – 232 с.
11. Казанин О.И. Перспективные направления развития технологий подземной угледобычи в РФ // Горный журнал. – 2023. – Т. 9. – С. 4 – 11.
12. Трофимов В.А., Кубрин С.С., Филиппов Ю.А., Харитонов И.Л. Общие закономерности деформирования угольного пласта вблизи демонтажной камеры при приближении забоя лавы // Горный информационно-аналитический бюллетень – 2018. – № S 48. – С. 222–233.
13. Блохин Д.И., Закоршменный И.М., Кубрин С.С., Кобылкин А.С., Поздеев Е.Э., Пушилилин А.Н. Численные исследования влияния изменений напряженно – деформированного состояния углепородного массива на устойчивость дегазационных скважин // Горный информационно – аналитический бюллетень. – 2023. – № 11. – С. 17–32.
14. Шейнин В.И., Дзагов А.М., Астраханов Б.Н., Блохин Д.И. Неравномерное всплытие заглубленного сооружения: анализ и рекомендации // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2022. – № 4. – С. 7 – 11.
15. Колыбин И.В. Уроки аварийных ситуаций при строительстве котлованов в городских условиях // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2008. – № 12. – С. 90 – 124.
16. Конюхов Д.С., Колыбин И.В. Основные принципы комплексного освоения подземного пространства Москвы. Требования современных строительных норм // Метро и тоннели. – 2021. – № 1. – С. 34 – 37.
17. Легасов В.А. Проблемы безопасного развития техносферы // Коммунист: Теорет. и практ. журн. ЦК КПСС. – 1987. – № 8. – С. 92 – 101.
18. Фуникова В.В, Дудлер И.В. Проблема нарастающей опасности техногенных изменений геологической среды и пути ее решения // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2022. – № 1. – С. 3 – 12.
19. Трухин В.И., Показеев К.В., Куницын В.Е. Общая и экологическая геофизика. – М.: Физматлит, 2005. – 576 с.

20. Адушкин В.В., Опарин В.Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия - к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. I // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 2. – С. 3 – 27.
21. Барях А.А., Санфиров И.А., Ярославцев А.Г. Задачи геофизики и геомеханики в обеспечении безопасного ведения горных работ на калийных рудниках // Горная промышленность. – 2025. – № S4. – С. 140 – 145.
22. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика горных пород. – М: Недра, 1975. – 272 с.
23. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса. – Пенза: ПГУАС, 2008 – 696 с.
24. Борисов, А. А. Расчет горного давления в лавах пологих пластов. – М : Недра, 1964. – 280.
25. Викторов С.Д., Иофис М.А., Гончаров С.А. Сдвигение и разрушение горных пород. – М.: Наука, 2005. – 277 с.
26. Еременко В.А., Гахова Л.Н., Семенякин Е.Н. Формирование зон концентрации напряжений и динамических явлений при отработке рудных тел Таштагольского месторождения на больших глубинах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 2. – С. 80 – 87.
27. Захаров В. Н., Забурдяев В.С., Артемьев В.Б. и др. Углепородные массивы: прогноз устойчивости, риски, безопасность Т.3: Подземные горные работы. Кн. 9. – М.: Горное дело, 2013. – 280 с.
28. Зерцалов М.Г. Геомеханика. Введение в механику скальных грунтов. – М.: Изд-во АСВ, 2014. – 349 с.
29. Иофис М.А., Шмелев А.И. Инженерная геомеханика при подземных разработках. – М.: Издательство "Недра", 1985. – 248 с.
30. Кочарян Г.Г., Спивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. – М.: Академкнига, 2003. – 422 с.
31. Кузнецов С.В., Одинцев В.Н., Слоним М.Э., Трофимов В. А. Методология расчета горного давления. – М.: Наука, 1981. – 104 с.

32. Кузьмин Ю.О., Жуков В.С. Современная геодинамика и вариации физических свойств горных пород. – М.: МГГУ, 2004. – 262 с.
33. Курленя М.В., Серяков В.М., Еременко А.А. Техногенные геомеханические поля напряжений. – Новосибирск: Наука, 2005. – 264 с.
34. Либерман Ю.М., Панов А.Д. Применение методов механики сплошных сред в исследованиях горного давления. – М.: Ин-т горного дела им. А.А. Скочинского, 1962. – 42 с.
35. Одинцев В. Н. Отрывное разрушение массива скальных горных пород. – М.: ИПКОН РАН, 1996. – 166 с.
36. Опарин В.Н., Козырев А.А., Панин В.И. и др. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия. – Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, 2012. – 632 с.
37. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. – М.: Недра, – 1983. – 280 с.
38. Протодяконов М.М. Давление горных пород и рудничное крепление. – М., 1931. – 186 с.
39. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Прочность горных пород и устойчивость выработок на больших глубинах. — М.: Недра, 1985.
40. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. – М.: Либроком. – 2010. – 360 с.
41. Руппенейт К.В., Либерман Ю.М. Введение в механику горных пород. – М.: Госгортехиздат, 1960, – 356 с.
42. Татаринов В.Н., Акматов Д.Ж., Маневич А.И., Шевчук Р.В. Иерархический подход к оценке устойчивости геологической среды в геомеханических исследованиях // Горный журнал. – 2024. – № 1. – С. 15 – 21.
43. Цытович Н.А., Тер – Мартиросян З.Г. Основы прикладной геомеханики в строительстве. – М.: Высш. школа, 1981. – 317 с.
44. Трофимов В.А., Кубрин С.С., Филиппов Ю.А., Харитонов И.Л. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния вмещающего массива и пологого мощного угольного пласта при завершении отработки выемочного столба

// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 8. – С. 42 – 56.

45. Trubetskoi K.N., Iofis M.A., Kuznetsov S.V., Trofimov V.A. Basic regularities governing the subsidence of undermined rock strata and deflection of hanging roof at shallow and great depths // Journal of Mining Science. – 1999. – Vol. 35. – №3. – Pp. 209 – 215.

46. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. – Л.: Недра, 1989. – 488 с.

47. Христианович С. А., Салганик Р. Л. Внезапные выбросы угля (породы) и газа. Напряжения и деформации / АН СССР. ИПМ. – Препр. № 153. – М., 1980.

48. Цытович Н.А. Механика грунтов. – М.: Кн. дом "ЛИБРОКОМ", 2012. – 271 с.

49. Шейнин В.И., Руппенейт К.В. Некоторые статистические задачи расчета подземных сооружений. – М.: Издательство "Недра", 1969. – 152 с.

50. Shemyakin E.I., Fisenko G.L., Kurlenya M.V. et al. Zonal disintegration of rocks around underground workings, Part 1: Data of in situ observations // Journal of Mining Science. – 1986. – Vol. 22, No. 3. – Pp. 157–168.

51. Казанцев В.Г. Обоснование рациональных пространственно-планировочных и технологических решений на базе эффективного управления геомеханическими процессами на угольных шахтах: специальность 25.00.22 "Геотехнология (подземная, открытая и строительная)": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Кемерово, 2003. – 316 с.

52. Рассказов И.Ю., Аникин П.А., Грунин А.П., Константинов А.В. Методы и средства геомеханического мониторинга для безопасного и эффективного освоения недр // Горный журнал. – 2025. – № 3. – С. 4 – 11.

53. Опарин В. Н., Аннин Б. Д., Чугуй Ю. В. и др. Методы и измерительные приборы для моделирования и натурных исследований нелинейных деформационно-волновых процессов в блочных массивах горных пород. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 330 с.

54. Витте В. Механика скальных пород. – М.: Недра, 1990. – 439 с.

55. Королев М.В. Системные инновации в методах исследования механических

свойств грунтов. – М.: Сам Полиграфист, 2018. – 376 с.

56. Шкуратник В.Л., Николенко П.В. Методы определения напряженно – деформированного состояния массива горных пород. – М.: МГГУ, 2012. – 111 с.

57. Влох Н.П., Сашурин А.Д. Измерение напряжений в массиве крепких горных пород. – М.: Недра, 1970. – 120 с.

58. Курленя М.В. Теория и практика измерений напряжений в осадочных породах (обзор) //Измерение напряжений в массиве горных пород. – Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1972. – С. 23 – 52.

59. Аксенов В.К., Курленя М.В., Петров А.И. Разгрузка массива щелью как средство для определения абсолютных напряжений в горных породах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1972. – № 2. – С. 122–124.

60. Шемякин Е.И., Курленя М.В., Кулаков Г.И. Кольцевые скважинные датчики для геомеханических исследований. – Новосибирск: Изд. СО РАН. –1985. – 133 с.

61. Кулаков Г.И. Использование фотоупругих датчиков в методе полной разгрузки // Физико – технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1980. – № 5. – С. 116 – 120.

62. Гужова С. В. Развитие методов измерения полных напряжений в массиве горных пород и в тубинговых крепях с использованием фотоупругих датчиков: специальность 25.00.20 "Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Новосибирск, 2003. – 154 с.

63. Захаров В.Н., Кубрин С.С., Фейт Г.Н., Блохин Д.И. Определение напряженно – деформированного состояния горных пород при разработке угольных пластов, опасных по гео- и газодинамическим явлениям // Уголь. – 2012. - № 10. – С. 34 – 36.

64. Wacławik P. Determination of stress state in rock mass using strain gauge probes CCBO // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 149. – Pp. 544 – 552.

65. Аксенов В.К., Курленя М.В. Некоторые особенности техники измерения напряжений в породном массиве гидравлическими датчиками // Измерение напряжений в массиве горных пород. 1972. – № 1. – С. 159–167.
66. А. с. № 1067138 А1 СССР. Способ определения напряженного состояния массива грунта / Ахпателов Д. М., Тер-Мартirosян З. Г., Манвелян Р. Г., Сидорчук В.Ф. и др. – 1984.
67. Глушко В.Т., Ямщиков В.С., Яланский А.А. Геофизические методы контроля в угольных шахтах и тоннелях. – М.: Недра, 1982. – 224 с.
68. Курленя М.В., Опарин В.Н. Скважинные геофизические методы диагностики и контроля напряженно – деформированного состояния массивов горных пород. – Новосибирск: Наука, 1999. – 335 с.
69. Булат А.Ф., Хохолев В.К. Геофизический контроль массива при отработке угольных пластов. – Киев: Наук. думка, 1990. – 165 с.
70. Тарасов Б.Г., Дырдин В.В. Физический контроль массивов горных пород. – М.: Недра, 1994. – 240 с.
71. Ямщиков В.С. Волновые процессы в массиве горных пород. – М.: Недра, 1985. – 348 с.
72. Турчанинов И.А., Панин В.И. Применение ультразвукового метод для определения напряжений в массиве пород // Изв. АН СССР, Физика Земли. – 1969. – №6.
73. Анциферов А.В. Теория и практика шахтной сейсморазведки. – Донецк., 2003. – 312 с.
74. Савич А.И., Куюнджич Б.Д., Коптев В.И. и др. Комплексные инженерно – геофизические исследования при строительстве гидротехнических сооружений. – М.: Недра, 1990. – 463 с.
75. Тарасов Б.Г., Дырдин В.В., Иванов В.В. Геоэлектрический контроль состояния массивов. – М.: Недра, 1983. – 203 с.
76. Курленя М.В., Вострецов А.Г., Кулаков Г.И., Яковицкая Г.Е. Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения горных пород. – Новосибирск: СО РАН, 2000. – 232 с.

77. Арцыбашев В.А. Гамма – метод измерения плотности. – М.: Атомиздат, 1965. – 204 с.
78. Смородинов М.И. Радиоизотопные методы контроля качества работ и исследований при устройстве фундаментов и подземных сооружений. – М.: Атомиздат, 1980. – 168 с.
79. Шейнин В.И. Особенности использования радиоизотопных измерений для оценки свойств грунтов // Вестник НИЦ Строительство. – 2014. – № 10. – С. 152 – 159.
80. Баженова Е.А. Применение геоакустической эмиссии и электромагнитного излучения в комплексе со стандартными методами геофизических исследований для выявления зон геодинамической активности в рудных скважинах // Литосфера. – 2025. – № 3. – С. 644 – 655.
81. Безродный К.П., Басов А.Д., Романевич К.В. Контроль напряженно-деформированного состояния массива горных пород при строительстве тоннелей методом ЕЭМИ // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2011. – № 1. – С. 227 – 234.
82. Простов С.М., Разумов Е.Е., Мулев С.Н. и др. Обоснование критериев локального прогноза удароопасности методом регистрации естественного электромагнитного излучения на шахтах Кузбасса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – № 12. – С. 99 – 110.
83. Тайлаков О.В., Салтымаков Е.А., Соколов С.В., Колесниченко С.Е. Мониторинг фоновых физических полей угольной шахты // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2022. – № 4. – С. 71 – 76.
84. Victorov S.D., Kochanov A.N., Odintsev V.N., Osokin A.A. Emission of submicron particles upon rock deformation // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2012. – Vol. 76. – No. 3. – Pp. 339 – 341.
85. Винников В.А., Вознесенский А.С., Устинов К.Б., Шкуратник В.Л. Теоретические модели акустической эмиссии в горных породах при различных режимах их нагревания // Прикладная механика и техническая физика. – 2010. – Т.

51. – № 1. – С. 100 – 105.

86. Вознесенский А.С., Шкуратник В.Л., Набатов В.В., Куткин Я.О. Оценка устойчивости приконтурного массива пород по результатам совместных скважинных измерений параметров акустической и электромагнитной эмиссии // Горный информационно – аналитический бюллетень (научно – технический журнал). – 2013. – № 8. – С. 64 – 70.

87. Lavrov A. Fracture-induced phenomena and memory effects in rocks: a review // Strain. – 2005. – Vol. 41. – № 4. – Pp. 135 – 149.

88. Вознесенский А.С., Набатов В.В. Оценка трещинообразования в массиве с гипсосодержащими породами методом регистрации электромагнитного излучения // Физико – технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2003. – № 3. – С. 3 – 12.

89. Николенко П.В. Аппаратурное и методическое обеспечение контроля сложного напряженного состояния массива с использованием эффектов памяти в упругих композиционных датчиках // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2019. – № 2. – С. 97– 104.

90. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. – М.: Наука, 2003. – 270 с.

91. Шкуратник В.Л., Новиков Е.А., Вознесенский А.С., Винников В.А. Термостимулированная акустическая эмиссия в геоматериалах. – М.: Горная книга, 2015. – 241 с.

92. Пантелеев И.А., Коваленко Ю.Ф., Сидорин Ю.В., Зайцев А.В., Карев В.И., Устинов К.Б., Шевцов Н.И. Эволюция поврежденности при сложном неравнокомпонентном сжатии песчаника по данным акустической эмиссии // Физическая мезомеханика. – 2019. – Т. 22. – № 4. – С. 56–63.

93. Яковицкая Г.Е. Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии. – Новосибирск: Параллель, 2008. – 313 с.

94. Cress G.O., Brady B.T., Rowell G.A. Sources of electromagnetic radiation from fracture of rock samples in the laboratory // Geophysical Research Letters. – 1987. – Vol.

– 14. – Pp. 331 – 334.

95. Carpinteri A., Lacidogna G., Borla O., Manuello A., Niccolini G. Electromagnetic and neutron emissions from brittle rocks failure: experimental evidence and geological implications // *Sadhana*. – 2012. – Vol. 37. – № 1. – Pp. 59 – 78.

96. Hardy Jr. H. R. *Acoustic Emission / Microseismic Activity*. – CRC Press, 2003. – 300 p.

97. Holcomb D.J. General Theory of the Kaiser effect // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. Geomechanics Abstract*. – 1993. – Vol. 30. – № 7. – Pp. 929–935.

98. Kaiser J. Erkenntnisse und Folgerungen aus der Messung von Gerauschen bei Zugbeanspruchung von metallischen Werkstoffen // *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. – 1953. – Vol. 24. – No. 1/2. – Pp. 43 – 45.

99. Lockner D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 1993. – Vol. 30. – № 7. – Pp. 883–899.

100. Luong M.P. Introducing infrared thermography in soil dynamics // *Infrared Physics & Technology*. – 2007. – Vol. 49. – Issue 3. – Pp. 306 – 311.

101. Ma L., Sun H., Zhang Y., Zhou T., Li K., Guo J. Characteristics of infrared radiation of coal specimens under uniaxial loading // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2016. – Vol. 49. – Issue 4. – Pp. 1567 – 1572.

102. Mogi K. Magnitude – Frequency Relationship for Elastic Shocks Accompanying Fractures of Various Materials and Some Related Problems in Earthquakes // *Bulletin of the Earthquake Research Institute*. – 1962. – Vol. 40. – Pp. 831 – 853.

103. Ogawa T., Oike K., Miura T. Electromagnetic radiations from rocks // *Journal of Geophysical Research*. – 1985. – Vol. 90. – Pp. 6245 – 6250.

104. Ohtsu M. Source mechanism and waveform analysis of acoustic emission in concrete // *Journal of Acoustic Emission*. – 1982. – Vol. 2. – № 1. – Pp. 103 - 112.

105. Seto M., Utagawa M., Katsuyama K., Kiyama T. In Situ Stress determination using AE and DRA techniques // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 1998. – Vol. 35. – j№ 4–5. – Pp. 458–459.

106. Wu L., Wang J. Infrared radiation features of coal and rocks under loading // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 1998. – Vol. 35. – Pp. 969–976.
107. Yixin Z., Yaodong J. Acoustic emission and thermal infrared precursors associated with bump-prone coal failure // International Journal of Coal Geology – 2010. – Vol. 83. – № 1. – Pp. 11 – 20.
108. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия: Применение для испытаний материалов и изделий. – М.: Издательство стандартов, 1976. – 272 с.
109. Лавров А.В., Шкурятник В.Л. Акустическая эмиссия при деформировании и разрушении горных пород (обзор) // Акустический журнал. – 2005. – Т. 51. – № 5. – С. 6 – 18.
110. Grosse C.U., Ohtsu M. Acoustic Emission Testing. Basics for research – Applications in Civil Engineering. – Springer publ, 2008. – 404 p.
111. Анциферов А.В., Глухов А.А. Комплекс обработки и анализ результатов микросейсмического мониторинга углепородных массивов // Горный журнал. – 2024. – № 10. – С. 7 – 13.
112. Разумов Е.Е., Рукавишников Г.Д., Мулёв С.Н., Простов С.М. Анализ сейсмической активности массива при ведении горных работ на шахте «Комсомольская» АО «Воркутауголь» // Горный информационно–аналитический бюллетень (научно – технический журнал). – 2022. – № 1. – С. 104–114.
113. ГОСТ 27655-88 «Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения».
114. Богомоллов Л.М., Манжиков Б.Ц., Трапезников Ю.А. и др. Виброупругость, акустопластика и акустическая эмиссия нагруженных горных пород // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42. – № 10. – С. 1678 – 1689.
115. Виноградов С.Д. Акустические наблюдения процессов разрушения горных пород. – М.: Наука, 1964. – 84 с.
116. Вознесенский А.С., Тавостин М.Н. Акустическая эмиссия угля в состоянии запредельного деформирования // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2005. – № 4. – С. 3 – 10.

117. Шевцов Н.И., Зайцев А.В., Пантелеев И.А. Исследование связи напряженно-деформированного состояния горных пород с потоком акустической эмиссии на испытательной системе трехосного независимого нагружения // Процессы в геосредах. – 2019. – № 1. – С. 129–136.
118. Шкуратник В.Л., Филимонов Ю.Л., Кучурин С.В. Экспериментальные исследования акустической эмиссии в образцах угля при одноосном нагружении // Физико – технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2004. – № 5. – С. 42 – 49.
119. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., Кошелев А.Е. Спектральные характеристики акустической эмиссии при нагружении образцов каменного угля и их использование для прогноза разрушения // Физико – технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 5. – С. 23 – 28.
120. Carpinteri A., Xu J., Lacidogna G., Manuello A. Reliable onset time determination and source location of acoustic emissions in concrete structures // Cement and Concrete Composites. – 2012. – Vol. 34. – № 4. – Pp. 529–537.
121. Frolov D.I., Kil'keev R.Sh., Kuksenko V.S. Study of the dynamics of microcrack fusion by the acoustic-emission method // Mechanics of Composite Materials. – 1981. – Vol. 17. – Pp. 104 – 107.
122. Новиков Е.А., Шкуратник В.Л., Зайцев М.Г., Клементьев Е.А., Блохин Д.И. Акустическая эмиссия мерзлых грунтов при квазистатическом механическом и циклическом термическом нагружении // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2020. – № 2. – С. 2 – 9.
123. Novikov E. A., Oshkin R. O., Shkuratnik V. L., Epshtein S.A., Dobryakova N.N. Application of thermally stimulated acoustic emission method to assess the thermal resistance and related properties of coals // International Journal of Mining Science and Technology. – 2018. – Vol. 28. – No 2. – Pp. 243–249.
124. Боровский Б.В., Богомолов Л.М., Закупин А.С., Мубассарова В.А. К вопросу о стимулировании акустической эмиссии образцов геоматериалов электромагнитными полями // Физика Земли. – 2011. – № 10. – С. 71–81.
125. Rodriguez V.I., Stanchits S. Spatial and temporal variation of seismic attenuation

during hydraulic fracturing of a sandstone block subjected to triaxial stress // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2017. – Vol. 122. – Pp. 9012–9030.

126. Stanchits S., Burghardt J., Surdi A. Hydraulic fracturing of heterogeneous rock monitored by acoustic emission // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2015. – Vol. 48. – № 6. – Pp. 2513–2527.

127. Dresen G., Stanchits S., Rybacki E. Borehole breakout evolution through acoustic emission location analysis // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2010. – Vol. 47. – Pp. 426–435.

128. Xu S., Li Y., Liu J. Detection of cracking and damage mechanisms in brittle granites by moment tensor analysis of acoustic emission signals // *Acoustical Physics*. – 2017. – Vol. 63. – № 3. – Pp. 359–367.

129. Захаров В.Н., Гуляев П.Н., Харченко А.В. Исследования акусто-вибрационных процессов углепородного массива в зонах ведения горных работ // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2005. – № 6. – С. 69 – 74.

130. Кривошеев И. А. Разработка акусто-эмиссионного метода и средств контроля напряженного состояния массива горных пород: специальность 25.00.20 "Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Москва, 2004. – 348 с.

131. Рассказов И.Ю., Мигунов Д.С., Аникин П.А. и др. Геоакустический портативный прибор нового поколения для оценки удароопасности массива горных пород // *Физико – технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2015. – № 3. – С. 169 – 179.

132. Шадрин А.В., Зыков В.С. Акустическая эмиссия выбросоопасных пластов. – М.: ЦНИЭИуголь, 1991. – 42 с.

133. Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. – М.: Наука, 2008. – 334 с.

134. Filimonov Y., Lavrov A., Shkuratnik V. Acoustic emission in rock salt: effect of loading rate // *Strain*. – 2002. – Vol. 38. – Pp. 157 – 159.

135. Ржевский В.В., Ямщиков В.С., Шкуратник В.Л. и др. Эмиссионные эффекты

"памяти" в горных породах // Доклады АН СССР. – 1983. – Т. 273. – № 5. – С. 1094 – 1097.

136. Петровский М.А., Панасьян Л.Л. Экспериментальное исследование эффекта Кайзера в горных породах // Вестник МГУ. – Сер. 4. Геология. – 1983. – № 3. – С. 98 – 101.

137. Лавров А.В., Шкурятник В.Л., Филимонов Ю.Л. Акустоэмиссионный эффект памяти в горных породах. – М.: Издательство МГГУ, 2004. – 450 с.

138. Пантелеев И.А., Мубассарова В.А., Зайцев А.В., Шевцов Н.И., Коваленко Ю.Ф., Карев В.И. Эффект Кайзера при трехосном сжатии песчаника с последовательным вращением эллипсоида заданных напряжений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 3. – С. 47 – 55.

139. Meng Q., Chen Y., Zhang M., Han L., Pu H., Liu J. On the Kaiser effect of rock under cyclic loading and unloading conditions: insights from acoustic emission monitoring // Energies. – 2019. – Vol. 12. – № 17. – Article 3255.

140. Tian, Y., Yu, R. & Zhang, Y. Application of Felicity Effect in Crack Stress Identification and Quantitative Damage Assessment of Limestone // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2020. – Vol. 53. – Pp. 2907–2913.

141. Zhang, Y., Chen, Y., Yu, R. et al. Effect of Loading Rate on the Felicity Effect of Three Rock Types // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2017. – Vol. 50. – Pp. 1673–1681.

142. Колодина И.В. Обоснование и разработка ультразвуковых способов оценки нарушенности природного камня под влиянием факторов выветривания: специальность 25.00.16 "Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва, 2006. – 159 с.

143. Асанов В.А., Евсеев А.В., Токсаров В.Н., Бельтюков Н.Л. Опыт изучения акустоэмиссионных эффектов в соляных породах с использованием скважинного гидродомкрата Гудмана // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно – технический журнал). – 2010. – № 10. – С. 144 – 148.

144. Бельтюков Н.Л. Особенности использования эффекта Кайзера для оценки напряженного состояния массива горных пород // Горное эхо. – 2019. – № 3. – С. 24 – 31.
145. Николенко П.В., Шкуратник В.Л., Чепур М.Д., Кошелев А.Е. Использование эффекта Кайзера в композиционных материалах для контроля напряженного массива горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2018. – № 1. – С. 25 – 31.
146. Рассказов М.И., Терешкин А.А., Цой Д.И. Оценка напряженного состояния массива месторождения "Пионер" на основе акустико-эмиссионного эффекта памяти горных пород // Проблемы недропользования. – 2019. – № 2(21). – С. 62 – 67.
147. Lehtonen A, Cosgrove JW, Hudson JA, Johansson E (2012) An examination of in situ rock stress estimation using the Kaiser effect // Engineering Geology. – 2012. – Vol. 124. – Pp. 24 – 37.
148. Ohtsu M., Ono K. A Generalized theory of acoustic emission and Green's functions in a half space // Journal of Acoustic Emission. – 1984. – Vol. 3. – № 1. – Pp. 124 – 133.
149. Куксенко В.С., Томилин Н.Г., Махмудов Х.Ф., Бенин А.В. Прогнозирование потери устойчивости нагруженных элементов конструкций методом акустической эмиссии // Письма в Журнал технической физики. – 2007. – Т. 33. – № 2. – С. 31 – 35.
150. Махмудов Х.Ф., Куксенко В.С., Томилин Н.Г., Бенин А.В. Диагностика потери устойчивости нагруженных железобетонных балок // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2013. – Т. 18. – № 4-2. – С. 1909 – 1910.
151. Перфилов В.А. Контроль деформации и разрушения бетонов методами механики разрушения и акустической эмиссии // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2014. – № 38(57). – С. 75 – 84.
152. Сагайдак А.И., Елизаров С.В. Связь сигналов акустической эмиссии с процессами деформирования и разрушения строительных конструкций //

Дефектоскопия. – 2004. – № 11. С. 32 – 39.

153. Сагайдак А.И. Исследование эффекта Кайзера в сжатых железобетонных элементах // Экспериментальные и теоретические исследования строительных конструкций. Сб. научн. тр. ЦНИИСК им. Кучеренко. – 1990. – С. 127 – 129.

154. Абрамова К.Б., Щербаков И.П., Русаков А.И., Семенов А.А. Эмиссионные процессы, сопровождающие деформирование и разрушение металлов // Физика твердого тела. – 1999. – Т. 41. – № 5. – С. 841 – 843.

155. Веттегрень В.И., Куксенко В.С., Щербаков И.П. Динамика фрактолюминесценции, электромагнитной и акустической эмиссии при ударе по поверхности мрамора // Журнал технической физики. – 2013. – Т. 83. – № 1. – С. 144 – 147.

156. Ботвенко Д.В., Попов В.Б., Ермолаев А.М., Казанцев В.Г. Исследования возможности и причин искрообразования при деформировании и разрушении горных пород // Безопасность труда в промышленности. – 2016. – № 10. – С. 62 – 64.

157. Малышков Ю.П., Фурса Т.В., Гордеев В.Ф., Шталин С.Г. Дефектоскопия и оценка напряженно-деформированного состояния бетона по параметрам электромагнитной эмиссии // Известия вузов. Строительство. – 1997. – № 12. – С. 114 – 117.

158. Frid V., Vozoff K. Electromagnetic radiation induced by mining rock failure // International Journal of Coal Geology. – 2005. – Issue 1. – Vol. 64. – Pp. 57 – 65.

159. Miroshnichenko M.I., Kuksenko V.S. Electromagnetic impulse radiation at crack origin in solid dielectrics // Fizika Tverdogo Tela. – 1980. – № 2. – С. 1531 – 1533.

160. Хатиашвили Н.Г. Об электромагнитном эффекте при трещинообразовании в щелочно-галогидных кристаллах и горных породах // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1984. – № 9. – С. 13 – 19.

161. Bepalko A.A., Fedotov P.I., Chulkov A.O., Yavorovich L.V., Shtirts V.A. Modelling of Infrared Glow in Rock Holes // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2019. – Vol. 38. – No 1. – P. 31.

162. Мешков А.А., Ледяев Н.В., Хамутский А.А. и др. Совершенствование способа регистрации электромагнитного излучения при нарушении сплошности

горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 6 – 2. – С. 135 – 148.

163. Фурса Т.В., Осипов К.Ю., Данн Д.Д. Разработка неразрушающего метода контроля прочности бетона с дефектной структурой на основе явления механоэлектрических преобразований // Дефектоскопия. – 2011. – № 5. – С. 39 – 47.

164. Осипов К.Ю., Фурса Т.В. Разработка метода определения глубины открытой трещины в бетоне по параметрам затухания электрического отклика на упругое ударное возбуждение // Письма в Журнал технической физики. – 2013. – Т. 39. – № 10. – С. 65 – 71.

165. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Аронов Е.Л. О высокочастотном электромагнитном излучении при сейсмической активности // Доклады Академии наук СССР. – 1979. – Т. 248. – № 5. – С. 1077–1081.

166. Малинникова О.Н. Условия формирования и методология прогнозирования газодинамических явлений при техногенном воздействии на угольные пласты: специальность 25.00.20 "Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Москва, 2011. – 269 с.

167. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. Т. 2 – М.: Мир, 1969 – 863 с.

168. Свелин Р.А. Термодинамика твердого состояния. – М.: Изд – во «Металлургия», 1968. – 316 с.

169. Гиляров В.Л., Слуцкер А.И. Описание термоупругого эффекта в твердых телах в широкой области температур // Физика твердого тела. – 2014. – Т. 56. – № 12. – С. 2407–2409.

170. Thompson (Lord Kelvin) On the Dynamical theory of heat // Transactions of the Royal Society of Edinburgh. – 1853. – Vol. 20. – Pp. 261 – 283.

171. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. — М.: Сов. радио, 1978. – 400 с.

172. ASTM D5470 –06. Standard Test Method for Thermal Transmission Properties of Thin Thermally Conductive Solid Electrical Insulation Materials. – ASTM International,

2006.

173. Лебедева В.В. Экспериментальная оптика. – М.: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2005. – 282 с.

174. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – М: ИД Спектр, 2009. – 544 с.

175. Belgen M.H. Structural Stress Measurements with an Infrared Radiometer // ISA Trans. – 1967. – Vol. 6.

176. Jordan E.H., Sandor B.I. Stress analysis from temperature data // Journal of Testing Evaluation. – 1978. – Vol. 6. – No. 6. – Pp. 325 – 331.

177. Оливер Д. Анализ полей напряжений с использованием теплового излучения. Экспериментальная механика. Кн. 2. Пер. с англ. / Под ред. А. Кобаяси. – М.: Мир, 1990. – 551 с.

178. Wu D., Salerno A., Busse G. Lockin – thermography for non-destructive evaluation of aerospace structures // 7th European Conference on Non-destructive Testing. – 1998.

179. Wong A.K., Ryall T.G. Performance of the FAST system for stress analysis // Experimental Mechanics. – 1995. – Vol. 34. – Pp. 148 – 152.

180. Lesniak J.R., Boyce B.R. A high speed differential thermography camera // Proceedings SEM Spring Conference on Experimental Mechanics. – 1999. – Pp. 491 – 497.

181. Chrysochoos A. Thermomechanical analysis of the cyclic behavior of materials // Procedia IUTAM 4. – 2012. – Pp. 15–26.

182. Stanley P., Chan W.K. Quantitative stress analysis by means of the thermoelastic effect // Journal of Strain Analysis. – 1985. – Vol. 20. – No 3. – Pp. 129 – 137.

183. Dulieu-Barton J.M., Stanley P. Development and applications of thermoelastic stress analysis // Journal of Strain Analysis. – 1988. – Vol. 33. 1988.

184. Pieczyska E.A., Maj M., Kowalczyk-Gajewska K. et al. Mechanical and Infrared Thermography Analysis of Shape Memory Polyurethane. Journal of Materials Engineering and Performance. – 2014. – Vol. 23. – Pp. 2553 – 2560.

185. Muneer K. M., Prakash R. V., Balasubramaniam K. Tensile deformation studies in glass/epoxy composite specimen using infrared thermography //

- International Journal of Aerospace Innovations. – 2010. – Vol. 2. – № 1. – Pp. 13–22.
186. Абрамова К.Б., Пахомов А.Б., Перегуд Б.П. и др. Инфракрасное излучение, возникающее при деформации и разрушении металлов // Журнал технической физики. – 1988. – Т. 58. – № 4. – С. 817 – 821.
187. Лукин Е.С., Иванов А.М., Вайнер Б.Г. Тепловизионные исследования в экспериментальной механике // Дефектоскопия. – 2003. – № 6. – С. 70-76.
188. Мойсейчик Е.А., Мойсейчик А.Е., Яковлев А.А. Визуализация кинетики пластических деформаций в стальных изделиях по инфракрасному излучению // Механика машин, механизмов и материалов. – 2024. – № 3 (68). – С. 78 – 87.
189. Плехов О.А. Экспериментальное исследование термодинамики пластического деформирования методом инфракрасной термографии // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81. – № 2. – С. 144 – 146.
190. Plekhov O.A. Experimental study of thermodynamics of plastic deformation by infrared thermography // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. – 2011. – Т. 56. – № 2. – Pp. 301 – 304.
191. Пригорнева С.В. Разработка методики оценки напряженного состояния фундаментов и грунтов оснований с использованием инфракрасного излучения // Автореф. дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. – М.: НИИОСП им. Н.М. Герсевича, 1987.
192. Мотовилов Э.А., Смородинов М.И., Шейнин В.И., Пригорнева С.В., Морозов А.А. Оценка напряженного состояния грунтов по измерению потока инфракрасного излучения // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1989. – № 1. – С. 24 – 26.
193. Ильичев В.А., Шейнин В.И. Возможности использования инфракрасной радиометрии для диагностики сейсмических процессов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2003. – № 2. – С. 16 – 20.
194. Шейнин В.И., Левин Б.В., Блохин Д.И., Фаворов А.В. Особенности идентификации нестационарных изменений напряженного состояния геоматериалов по данным инфракрасной радиометрии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2003. – № 5. – С. 15 – 22.

195. Luong M.P. Infrared thermovision of damage processes in concrete and rock // *Engineering Fracture Mechanics*. – 1990. – Vol. 35(1-3). – Pp. 291 – 301.
196. Середин В.В., Хрулев А.С. Изменения температуры образцов горных пород и геоматериалов при их разрушении // *Физико – технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2016. – № 4. – С. 63 – 69.
197. Мирсаяпов И.Т. Выявление зон концентрации напряжений при циклическом нагружении методом тепловизионного контроля // *Известия РАН. Механика твердого тела*. – 2010. – № 1. – С. 166 – 173.
198. Wu L., Liu S., Wu Y., Wang C. Precursors for fracturing and failure - Part II: IRR T - Curve abnormalities // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2006. – Vol. 43. – Issue 3. – Pp. 483 – 493.
199. Sun H., Ma L., Adeleke N., Zhang Y. Background thermal noise correction methodology for average infrared radiation temperature of coal under uniaxial loading // *Infrared Physics & Technology*. – 2017. – Vol. 81. – Pp. 157 –165.
200. Ma L., Sun H., Zhang Y., Zhou T., Li K., Guo J. Characteristics of infrared radiation of coal specimens under uniaxial loading // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2016. – Vol. 49. – Issue 4. – Pp. 1567 – 1572.
201. Ma L., Zhang Y., Cao K., Wang Z. An Experimental Study on Infrared Radiation Characteristics of Sandstone Samples Under Uniaxial Loading // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2019. – Pp. 3493 – 3500.
202. Shen R., Li H., Wang E., Chen T., Li T., Tian H., Hou Z. Infrared radiation characteristics and fracture precursor information extraction of loaded sandstone samples with varying moisture contents // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2020. – Vol. 130. – Article 104344.
203. Cao K., Ma L., Wu Y. et al. Cyclic fatigue characteristics of rock failure using infrared radiation as precursor to violent failure: Experimental insights from loading and unloading response // *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. – 2021. – Vol. 44. – Pp. 584–594.
204. Cao K., Ma L., Zhang D., Lai X., Zhang Z., Khan N. M. An experimental study of infrared radiation characteristics of sandstone in dilatancy process // *International Journal*

of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2020. – Vol. 136. – Article 104503.

205. Lou Q., He X. Experimental study on infrared radiation temperature field of concrete uniaxial compression // Infrared Physics & Technology. – 2018. – Vol. 90. – Pp. 20 – 30.

206. Балусева М.А., Блохин Д.И., Саваторова В.Л., Талонов А.В., Шейнин В.И. Моделирование влияния микротрещин в геоматериалах на изменения их температуры при деформировании // Физико – технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2009. – № 6. – С. 69 – 74.

207. Власов А.Н., Саваторова В.Л., Талонов А.В. Описание физических процессов в структурно неоднородных средах. – М.: Российский ун – т дружбы народов, 2009. – 258 с.

208. Житников Ю.В., Тулинов Б.М. Расчет деформационных свойств твердого тела с закрытой трещиноватостью в сложнапряженном состоянии // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1984. – № 1. – С. 117 – 124.

209. Слепян Л.И. Механика трещин. – Л.: Судостроение, 1990. – 296 с.

210. Талонов А.В., Тулинов Б.М. Расчет упругих характеристик трещиноватых сред в сложнапряженном состоянии // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1988. – № 6. – С. 184 – 187.

211. Карслоу Г.С., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 487 с.

212. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977. – 736 с.

213. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Наука, 1979. – 496 с.

214. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / под ред. Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, М.М. Протодяконова. – М.: Недра, 1975. – 279 с.

215. Ильин А.С. Разработка и исследование термоэлектрических первичных измерительных преобразователей для эталонных, образцовых и рабочих средств измерений энергетических характеристик оптического излучения сплошного и дискретного спектра в диапазоне длин волн 0,25 – 15 мкм. Диссертация на

соискание ... к.т.н. Москва, 1985. – 240 с.

216. Ильин А.С. Термоэлектрические приемники оптического излучения с пленочными и проволочными термопарами для прецизионных измерений // Метрология. – 2005. – № 11. – С. 19 – 30.

217. Блохин Д.И., Кубрин С.С., Шейнин В.И. Опыт и перспективы применения методов и средств ИК–радиометрической диагностики для геомеханического мониторинга разрабатываемого массива горных пород // Уголь. – 2008. – № 10. – С. 26 – 27.

218. Блохин Д.И., Дегтерев В.В. Программно–измерительный комплекс инфракрасной диагностики изменений напряженного состояния горных пород // Метрология, автоматизация и моделирование в угольной промышленности. Сборник научных трудов. – М.: Институт Гипроуглеавтоматизация. – 2009. – С. 65 – 70.

219. Шейнин В.И., Блохин Д.И. Экспериментальное исследование возможностей комплексного использования терморadiационных и акустоэмиссионных измерений для диагностики процессов деформирования и разрушения геоматериалов // Вестник НИЦ «Строительство». – 2014. – № 10. – С. 160 – 165.

220. Блохин Д.И. Инфракрасная диагностика геомеханических процессов в горных выработках, обусловленных природными и техногенными факторами // Маркшейдерия и недропользование. – 2025. – № 6. – С. 43 – 48.

221. Басов А.Д., Романевич К.В. Экспериментальные исследования напряженно – деформированного состояния горных пород и конструкций крепи при строительстве тоннеля на участке Северокавказской железной дороги Сочи – Адлер // Инженерная геология. – 2013. – № 6. – С. 28 – 37.

222. Шейнин В.И., Блохин Д.И., Дружинская Д.С. Влияние скорости нагружения образцов геоматериалов на кинетику измеряемых термомеханических параметров // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках. Материалы XX Международной научной школы им. академика С.А. Христиановича. – Симферополь: Таврич. нац. университет. – 2010. – С. 377 – 381.

223. Жигалкин В.М., Усольцева О.М., Семенов В.Н., Цой П.А., Асанов В.А., Барях А.А., Паньков И.Л., Токсаров В.Н. Деформирование квазипластичных соляных пород при различных условиях нагружения. Сообщение 1: Закономерности деформирования соляных пород при одноосном сжатии // Физико – технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2005. – № 6. – С. 14 – 25.
224. Блохин Д.И., Мудрецова Л.В. Экспериментальные исследования проявлений термомеханических эффектов при деформировании пластичных геоматериалов // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2018. – Т. 23. – № 122. – С. 37 – 40.
225. Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. – СПб.: Наука, 2001 – 343 с.
226. Sheynin V.I., Blokhin D.I., Favorov A.V. The instrumentation of parameters of thermal radiation and of acoustic emission as a source of information concerning the processes of deformation of soft rock specimens // Proceeding of the 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering – Geotechnics of Hard Soils – Weak Rocks. – Amsterdam: IOS Press. – 2011. – pp. 267 – 273.
227. Шейнин В.И., Блохин Д.И. Определение стадий деформирования образцов каменной соли при различных режимах нагружения по данным акустоэмиссионной и терморadiационной диагностики // Горный информационно–аналитический бюллетень. – 2013. – № 1. – С. 98 – 106.
228. Шейнин В.И., Блохин Д.И. Исследования особенностей проявления термомеханических эффектов при одноосном сжатии образцов каменной соли // Физико–технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 1. – С. 46 – 54.
229. Берон А.И., Ватолин Е.С., Койфман М.И., Мохначев М.П., Чирков С.Е. Свойства горных пород при разных видах и режимах нагружения. – М.: Недра, 1984. – 276 с.
230. Шилин А.А. Кирпичные и каменные конструкции: Повреждения и ремонт. – М.: Горная книга, 2009. – 215 с.

231. Kravcov A., Cherepetskaya E., Svoboda P., Blokhin D., Ivanov P., Shibaev I. Thermal Infrared Radiation and Laser Ultrasound for Deformation and Water Saturation Effects Testing in Limestone // *Remote Sensing*. – 2020. – Vol. 12. – № 24. – Article. 4036.
232. Блохин Д.И., Иванов П.Н., Дудченко О.Л. Экспериментальное исследование термомеханических эффектов в водонасыщенных известняках при их деформировании // *Записки Горного института*. – 2021. – Т. 247. – С. 1 – 10.
233. Victorov S.D., Kochanov A.N., Pachezhertsev A.A. Experimental study of the microstructural characteristics of the surfaces and volumes of granite samples // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2018. – Vol. 82. – №. 7. – Pp. 786 – 788.
234. Карабутов А.А., Макаров В.А., Черепецкая Е.Б., Шкурятник В.Л. Лазерно – ультразвуковая спектроскопия горных пород. – М.: Горная книга, 2008. – 169 с.
235. Винников В.А., Черепецкая Е.Б., Захаров В.Н., Малинникова О.Н. Исследование структуры и упругих свойств геоматериалов с помощью контактной широкополосной ультразвуковой структуроскопии // *Горный журнал*. – 2017. – № 4. – С. 29 – 32.
236. Karabutov A.A., Podymova N.B., Cherepetskaya E.B. Measuring the dependence of the local Young's modulus on the porosity of isotropic composite materials by a pulsed acoustic method using a laser source of ultrasound // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2013. – Vol. 54. – Pp. 500 – 507.
237. Капитонов А.М., Васильев В.Г. Физические свойства горных пород западной части Сибирской платформы. – М.: Инфра – М, 2018. – 424 с.
238. Sheinin V.I., Blokhin D.I., Novikov E.A., Mudretsova L.V. Study of Limestone Deformation Stages on The Basis of Acoustic Emission and Thermomechanical Effects // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 2020. – Vol. 56. – No. 6. – Pp. 398 – 401.
239. Аверин А.П., Блохин Д.И. Лабораторное тестирование технических средств системы геотомографического мониторинга газоносных угольных пластов // *Горный информационно–аналитический бюллетень*. – 2012. – № 11. – С. 46 – 50.
240. Cai X., Zhou Z., Tan L., Zang H., Song Z. Water Saturation Effects on Thermal

- Infrared Radiation Features of Rock Materials During Deformation and Fracturing // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2020. – Vol. 53 (11). – Pp. 1 – 18.
241. Lu Y., Wang L., Sun X., Wang J. Experimental study of the influence of water and temperature on the mechanical behavior of mudstone and sandstone / // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2017. – Vol. 76 (2). – Pp. 645 – 660.
242. Barker Jr. R.E. An approximate relation between elastic moduli and thermal expansivities // Journal of Applied Physics. – 1963. – Vol. 34. – №. 1. – Pp. 107 –116.
243. Люкшин П.А., Люкшин Б.А., Матолыгина Н.Ю., Панин С.В. Определение эффективных теплофизических характеристик композиционного материала // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11. – № 5. – С. 103 – 110.
244. ASTM C830-00. Standard Test Methods for Apparent Porosity, Liquid Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Refractory Shapes by Vacuum Pressure. – ASTM International, 2016.
245. Бахтина А.С., Блохин Д.И., Шейнин В.И. Непрерывное вейвлет – разложение как средство повышения информативности спектрального анализа данных физических измерений в системах геоконтроля // Горный информационно–аналитический бюллетень. – 2008. – № 3. –С. 124 – 130.
246. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций. – М.: Наука, 1968. – 464 с.
247. Серебренников М.Г., Первозванский А.А. Выявление скрытых периодичностей. – М.: Наука, 1965. –244 с.
248. Романенко А.Ф., Сергеев Г.А. Вопросы прикладного анализа случайных процессов. – М.: Советское радио, 1968. – 256 с.
249. Блохин Д.И. Методика оценки "быстропротекающих" изменений напряженного состояния грунтов и горных пород по данным инфракрасной (ИК-) радиометрии: специальность 25.00.20 "Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва, 2005. – 93 с.
250. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: в 2-х томах. – М.: Мир. 1983.

251. Любушин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. – М.: Наука, 2007. – 228 с.
252. Витязев В.В. Вейвлет – анализ временных рядов. – СПб.: Издательство С. – Петерб. ун-та, 2001. – 58 с.
253. Короновский А.А., Храмов А.Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. – М.: Физматлит, 2003. – 176 с.
254. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения: В 2-х томах. Пер. с англ. – М.: Мир, 1971.
255. Бендат Дж., Пирсол А. Применения корреляционного и спектрального анализа. – М.: Мир, 1983. – 312 с.
256. Хаттон Л., Уорддингтон М., Мейкин Дж. Обработка сейсмических данных. Теория и практика. – М.: Мир, 1989. – 216 с.
257. Астафьева Н.М. Вейвлет анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. – Т. 166. – № 11. – С. 1145 – 1170.
258. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB: учебное пособие. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 448 с.
259. Шейнин В.И., Блохин Д.И., Дружинская Д.С., Брысин В.П. Взаимосвязь проявлений акустикоэмиссионных и термомеханических эффектов на нелинейных стадиях процесса деформирования геоматериалов в режиме нагружение – разгрузка / Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках. Материалы XXI Международной научной школы им. академика С.А. Христиановича. – Симферополь: Таврич. нац. университет. – 2011. – С. 399 – 403.
260. Блохин Д.И., Харченко А.В. Комплексное исследование акустоэмиссионных и термомеханических эффектов в образцах каменной соли при их циклическом деформировании // Горный информационно–аналитический бюллетень. – 2021. – № 4 – 1. – С. 129 – 137.
261. Шейнин В.И., Блохин Д.И., Максимович И.Б., Сарана Е.П. Экспериментальное исследование проявлений термомеханических эффектов на линейной и нелинейной стадиях деформирования образцов каменной соли в

режиме циклического нагружения // Физико–технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – № 6. – С. 15 – 22.

262. Blokhin D.I., Sheinin V.I. Thermomechanical effects in different geomaterials in limiting behavior of cyclic loading // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 773. – Article. 012055.

263. Блохин Д.И., Черепецкая Е.Б. Оценка степени нарушенности образцов каменной соли при их циклическом деформировании (по данным терморadiометрических измерений) // Маркшейдерия и недропользование. – 2026. – № 2. – С. 47 – 52.

264. Мохначев М. П. Усталость горных пород. – М.: Наука, 1979. – 152 с.

265. Ерышев В.А., Тошин Д.С. Диаграмма деформирования бетона при немногokратных повторных нагружениях // Известия вузов. Строительство. – 2005. – № 10. – С. 109 – 114.

266. Fuenkajorn K., Phueakphum D. Effects of cyclic loading on mechanical properties of Maha Sarakham salt // Engineering Geology. – 2010. – Vol. 112. – No. 1. – Pp. 43–52.

267. Guo Y.T., Zhao K.L., Sun G.H., Yang C.H., Hong–Ling M.A., Zhang G.M. Experimental study of fatigue deformation and damage characteristics of salt rock under cyclic loading // Rock and Soil Mechanics. – 2011. – Vol. 32. – No 5. – Pp. 1353 – 1359.

268. Badge M.N., Petros V. Fatigue and dynamic energy behavior of rock subjected to cyclical loading // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2009. – Vol. 46. – Pp. 200–209.

269. Momeni A., Karakus M., Khanlari G. R., Heidari M. Effects of cyclic loading on the mechanical properties of a granite // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2015. – Vol. 77. – Pp. 89–96.

270. Богданов Ю.М., Журавлева Т.Ю., Сильверстов Л.К., Тавостин М.Н. Результаты исследования геомеханических процессов при закачке и отборе газа на ПХГ в каменной соли // Газовая промышленность. – 2010. – № 6. – С. 72 – 75.

271. Леметр Ж. Континуальная модель повреждения, используемая для расчета разрушения пластичных материалов // Тр. Амер. общества инженеров – механиков. Теор. основы инж. расчетов. – 1985. – Т. 107. – № 1. – С. 90 – 98.

272. Liu J., Xie H., Hou Z., Yang C., Chen L. Damage evolution of rock salt under cyclic loading in uniaxial tests // *Acta Geotechnica*. – 2014. – Vol. 9. – № 1. – Pp. 153–160.
273. ГОСТ 28985-91 «Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии».
274. Шейнин В.И., Блохин Д.И. Фиксация методом ИК–радиометрии изменений амплитуды волнового возмущения, вызванного ударными нагрузками, в околоскважинном пространстве грунтового объема // 75 лет НИИОСП им. Н.М. Герсевича. Сборник научных трудов. – М.: Изд. «ЭСТ». – 2006. – С. 143 – 148.
275. Шейнин В.И., Блохин Д.И. Фиксация методом ИК–радиометрии «быстропротекающих» изменений напряженного состояния «крупномасштабных» образцов, имитирующих массивы скальных и нескальных пород // Горный информационно–аналитический бюллетень. – 2006. – № 5. – С. 90 – 97.
276. Шейнин В.И., Блохин Д.И., Ягель Н.В. Исследование деформационных процессов в околоскважинном пространстве модели грунтового массива с использованием инфракрасной радиометрии / GEOMOS 26. Интеллект на страже механической безопасности. Труды 2-й Международной научно–практической конференции по механике грунтов, геотехнике и фундаментостроению. – М.: НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», 2026. – С. 858 – 863.
277. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
278. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. Под ред. Э.И. Григолюка. – М.: Мир, 1976. – 464 с.
279. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.
280. Вознесенский А.С. Моделирование физических процессов горного производства. – М.: Издательский Дом НИТУ «МИСиС», 2023. – 291 с.
281. Власов А.Н., Волков – Богородский Д.Б. и др. Конечно–элементное моделирование задач геомеханики и геофизики // Вестник МГСУ. – 2012. – № 2. – С. 52 – 65.

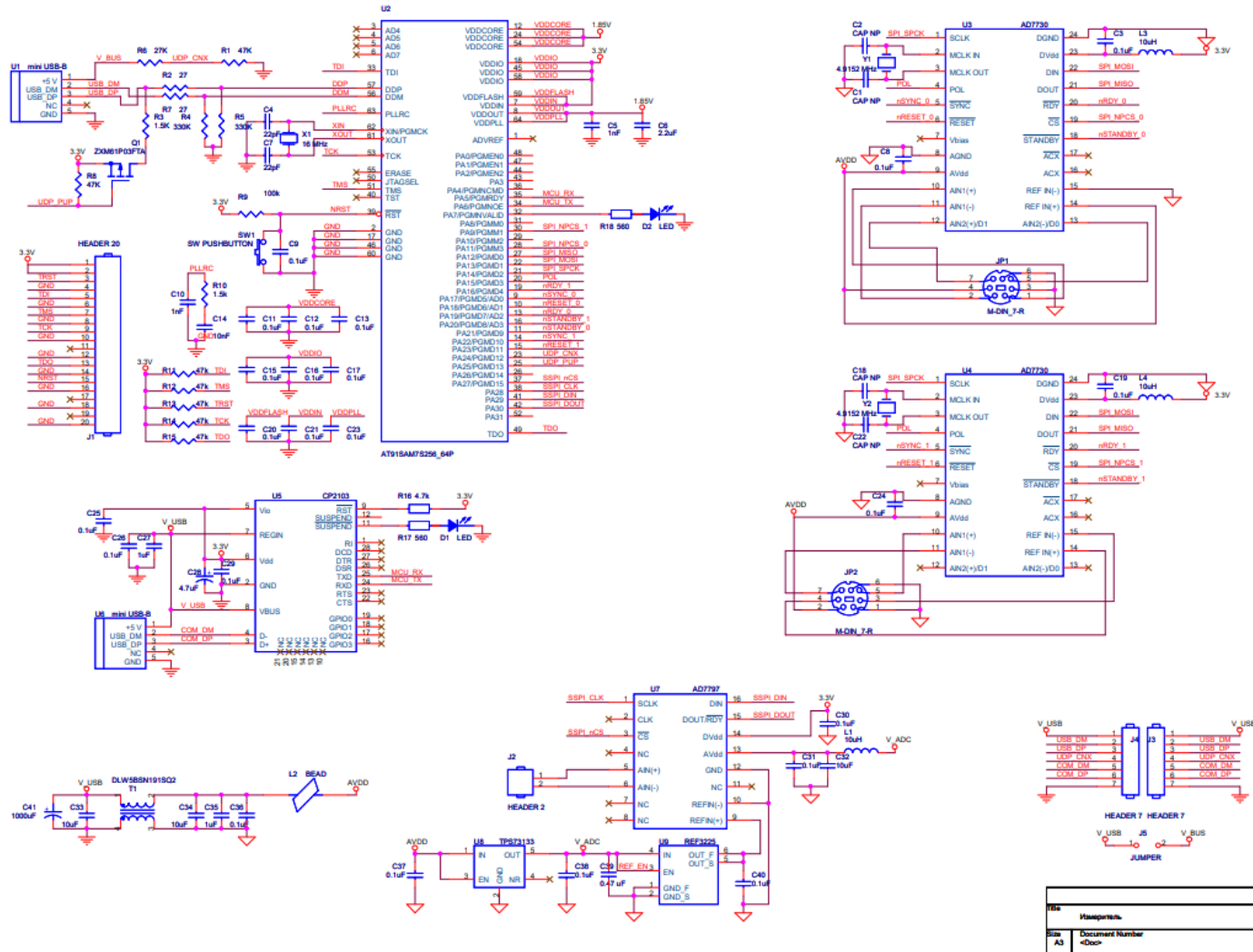
Приложение А Программа для расчета значений интенсивности полного излучения, интенсивности излучения $W_{\lambda_1 \rightarrow \lambda_2}$ в диапазоне длин волн от λ_1 до λ_2

```

1  import numpy as np
2  from scipy.integrate import quad
3
4  # константы
5  h = 6.626e-34      # Дж·с
6  c = 3.0e8          # м/с
7  k = 1.381e-23      # Дж/К
8  sigma = 5.670374419e-8 # Вт/(м^2·К^4)
9
10 T = 293 # температура, К
11
12 # спектральная плотность излучения
13 def plankcs_equation(lmbd):
14     return (2*np.pi*h*c**2) / (
15         lmbd**5 * (np.exp(h*c/(lmbd*k*T)) - 1)
16     )
17
18 # пределы интегрирования
19 lmbd_min = 2e-6 # 2 мкм
20 lmbd_max = 14e-6 # 14 мкм
21
22 lmbd_min_2 = 0.2e-6
23 lmbd_max_2 = 500e-6 # 500 мкм
24
25 # интеграл
26 result, err = quad( plankcs_equation, lmbd_min, lmbd_max)
27
28 # полное излучение
29 total = sigma * T**4
30
31 result_2, err_2 = quad( plankcs_equation, lmbd_min_2, lmbd_max_2)
32 # процент
33 percent = 100 * result / result_2
34
35 print(f"Излучение в диапазоне: {result:.3f} Вт/м²")
36 print(f"Полное излучение: {result_2:.3f} Вт/м²")
37 print(f"Полное излучение по закону Ст-Больц: {total:.3f} Вт/м²")
38 print(f"Доля: {percent:.2f} %")

```

Приложение Б Принципиальная электрическая схема ИК-радиометра



Приложение В Методика расчета скоростей квазипродольных упругих волн в кальците

Условия существования собственных значений фазовых скоростей и собственных векторов с компонентами U_l ($l = 1, 2, 3$) в квазипродольных и квазипоперечных волнах, распространяющихся в среде произвольном направлении, определяются с помощью уравнения Грина–Кристоффеля:

$$(\Gamma_{il} - \rho \cdot V^2 \cdot \delta_{il}) \cdot U_l = 0, \quad (\text{B.1})$$

где ρ – плотность материала, V – фазовая скорость, Γ_{il} ($i = 1, 2, \dots, 6$) – тензор Кристоффеля, δ_{il} – символ Кронекера.

Система (B.1) имеет единственное нетривиальное решение, если определитель, состоящий из коэффициентов в точке U_l , равен нулю:

$$(\Gamma_{il} - \rho \cdot V^2 \cdot \delta_{il}) = 0. \quad (\text{B.2})$$

Уравнение (B.2) в общем случае является кубическим уравнением относительно $\rho \cdot V^2$.

Для направления $|110\rangle$ класса тригональной симметрии компоненты тензора Кристоффеля следующие:

$$\Gamma_{11} = C_{11} + C_{66}; \Gamma_{12} = C_{12} + C_{66}; \Gamma_{22} = C_{66} + C_{11}; \Gamma_{13} = 2C_{14}; \\ \Gamma_{33} = 2C_{44}; \Gamma_{23} = -C_{14}.$$

Тогда определитель (B.2) выглядит следующим образом:

$$\begin{vmatrix} C_{11} + C_{66} - \rho \cdot V^2 & C_{22} + C_{66} & 2C_{14} \\ C_{12} + C_{66} & C_{66} + C_{11} - \rho \cdot V^2 & -C_{14} \\ 2C_{14} & -C_{14} & 2C_{44} - \rho \cdot V^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (\text{B.3})$$

Этот определитель эквивалентен кубическому уравнению относительно $\rho \cdot V^2$, корни которого определяют фазовые скорости двух квазипересекающихся волн и одной квазипродольной волны, которым соответствует наибольшее значение.

Приложение Г Методика оценки геомеханического состояния локальных участков породного массива на основе мониторинга его теплового поля

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»
Кафедра физики



Утверждаю
Проректор по науке
и инновациям НИТУ МИСИС
Д.т.н., проф. Филонов М.Р.

« 24 » марта 2026 г.

МЕТОДИКА

оценки геомеханического состояния локальных участков породного массива
на основе мониторинга его теплового поля

Разработал:
доцент кафедры физики, к.т.н
Д.И. Блохин

Методика рассмотрена и одобрена
на заседании кафедры ФизГео НИТУ МИСИС

Протокол № 8 от «17» марта 2026 г.

зав. каф., д.ф. – м.н. В.А. Винников

МОСКВА

2026

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
1. Назначение методики	3
2. Нормативные ссылки	3
3. Термины и определения	4
4. Физические основы методики	4
3. Оборудование	5
4. Техника безопасности	9
5. Подготовка к проведению измерений	9
5.1 Получение предварительной инженерно-геологической и геофизической информации	9
5.2 Построение тарировочных кривых	10
5.3 Организация измерительной станции	11
5.4. Подготовка средств измерений	12
6. Проведение измерений	12
7. Обработка результатов измерений	14
8. Представление результатов измерений	15
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	16

1. Назначение методики

Настоящие методические рекомендации распространяются на горные выработки и элементы строительных конструкций подземных сооружений и регламентируют проведение мониторинга изменений во времени напряженно – деформированного состояния указанных объектов с использованием средств бесконтактной терморадиометрической диагностики, размещаемых в измерительных скважинах.

К числу основных практических задач, для решения которых используются результаты терморадиометрических измерений, относятся:

1) оперативный контроль за динамикой зон разгрузки в массиве при экспериментальных исследованиях напряженного состояния массива и при выполнении горнопроходческих и очистных работ.

2) оперативный контроль за динамикой деформационных процессов в эксплуатируемых подземных выработках, обеспечивающий своевременное выполнение мероприятий по стабилизации работы сооружения и позволяющий избежать возможные аварии.

2. Нормативные ссылки

Н1. ГОСТ Р 50544 – 93 Породы горные. Термины и определения.

Н2. ГОСТ Р 57719 – 2017 Горное дело. Выработки. Термины и определения.

Н.3 ГОСТ 21153.2 – 84 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии.

Н4. ГОСТ 21153.2 – 84 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии.

Н5. СП 305.1325800.2017 ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. Правила проведения геотехнического мониторинга при строительстве.

Н6. Федеральный закон "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" от 21.07.1997 N 116 – ФЗ (последняя редакция).

3. Термины и определения

В настоящих рекомендациях использованы термины и определения по ГОСТ Р 50544-93, ГОСТ Р 57719-2017 и СП 305.1325800.2017, а также следующие термины:

Терморadiометрическая (ИК-) диагностика геоматериалов – метод неразрушающего контроля, основанный на измерении изменений интенсивности инфракрасного (ИК) излучения с поверхности горных пород, грунтов и других геоматериалов при их деформировании.

Термоупругий эффект – это изменение температуры твёрдого тела при его упругом деформировании в условиях адиабатичности (без теплообмена с окружающей средой).

Термопластический эффект – это изменение температуры твёрдого тела при его пластическом деформировании, сопровождающееся необратимым преобразованием механической энергии в тепловую.

4. Физические принципы

Метод терморadiометрической бесконтактной диагностики (инфракрасной (ИК-) радиометрии) основан на использовании известных термомеханических эффектов: изменении температуры твердого тела при ее адиабатическом деформировании («термоупругий» и «термопластический» эффекты), а также зависимости мощности инфракрасного излучения с поверхности тела от температуры [1 – 3].

Хорошим приближением в описании «термоупругого» эффекта является формула Кельвина:

$$\Delta T = A_m \cdot T_0 \cdot \Delta P, \quad (1)$$

где T_0 и ΔT – начальная температура тела и ее изменение при нагружении, ΔP – изменение первого инварианта тензора напряжений, $A_m = \alpha / \rho \cdot C_p$ [1 / Па] (α – линейный коэффициент термического расширения, C_p – удельная (на единицу объема) теплоемкость, ρ – плотность материала).

Возможность получения информации о $\Delta P(t)$ по измерениям $\Delta T(t)$ представляется очевидной, однако ее реализация для геоматериалов затруднена тем, что значения $\Delta T(t)$ имеют порядок 0,001 К. Кроме того, условия реальных геомеханических и геофизических экспериментов не позволяют использовать стандартные методы температурных измерений, особенно при измерениях в грунтах.

В описываемой методике применяется принцип бесконтактного измерения малых вариаций температуры, основанный на известной зависимости интенсивности ИК – излучения с поверхности тела от ее температуры $w(T) = \varepsilon_T \sigma T^4$ ($\varepsilon_T < 1$ – коэффициент излучательной способности, σ – постоянная Стефана – Больцмана) [3]. Малость $\Delta T(t)/T_0$ позволяет линеаризовать последнее соотношение и связать вариации интенсивности ИК-излучения $\Delta w(T(t))$ с $\Delta T(t)/T_0$ пропорциональной зависимостью с коэффициентом $A_c = 4\varepsilon_T \sigma T_0^4$ [Вт / м²]. Предполагая далее пропорциональность вариаций результатов ИК – измерений $\Delta U(t)$ вариациям $\Delta w(T(t))$ с коэффициентом A_r , зависящим от параметров аппаратуры и используя (1), получаем:

$$\Delta P(t) = A^{-1} \Delta U(t), \quad (2)$$

где $A = A_m A_c A_r$ [В/Па].

ИК – измерения позволяют оценивать вариации только первого инварианта тензора напряжений, что является существенным ограничением возможностей методики. Кроме того, измерения выполняются на поверхности элементарного объема обследуемого породного массива, размеры которого определяются геометрией используемого терморadiометрического элемента. Однако, так как задание суммы главных напряжений P в точке границы часто равносильно полному заданию тензора напряжений в этой точке, информация о $\Delta P(t)$ в некоторой характерной точке на поверхности обследуемого объекта – существенная информация при решении некоторых «обратных» задач, позволяющая при определенных схемах оценивать полную картину

изменений напряжений в представляющей интерес области. Например, используя решение известной задачи теории упругости о напряжениях на торце полубесконечной цилиндрической полости в упругом пространстве и определив временную зависимость $\Delta P(t)$ на забое скважины в массиве, можно (в принимаемых чаще всего в прикладной геомеханике предположениях о связи горизонтальных и вертикальных напряжений «на бесконечности» через коэффициент бокового давления), оценить изменения напряженного состояния в окрестности этого забоя.

5. Оборудование

Датчик – зонд измерения параметров термоэмиссии горного массива предназначен для оценки изменений напряжений горных пород. Зонд регистрации параметров термоэмиссии (терморациометрический зонд) представляет собой комплекс, состоящий из корпуса и терморациометрического чувствительного элемента РТН – 30Г [4] (см. рисунок 1).



Рис.1.Общий вид датчик – зонда измерения параметров термоэмиссии горного массива

На рисунке 2 представлен общий вид термоэлемента РТН – 30Г, а на рисунке 3 его принципиальная схема.

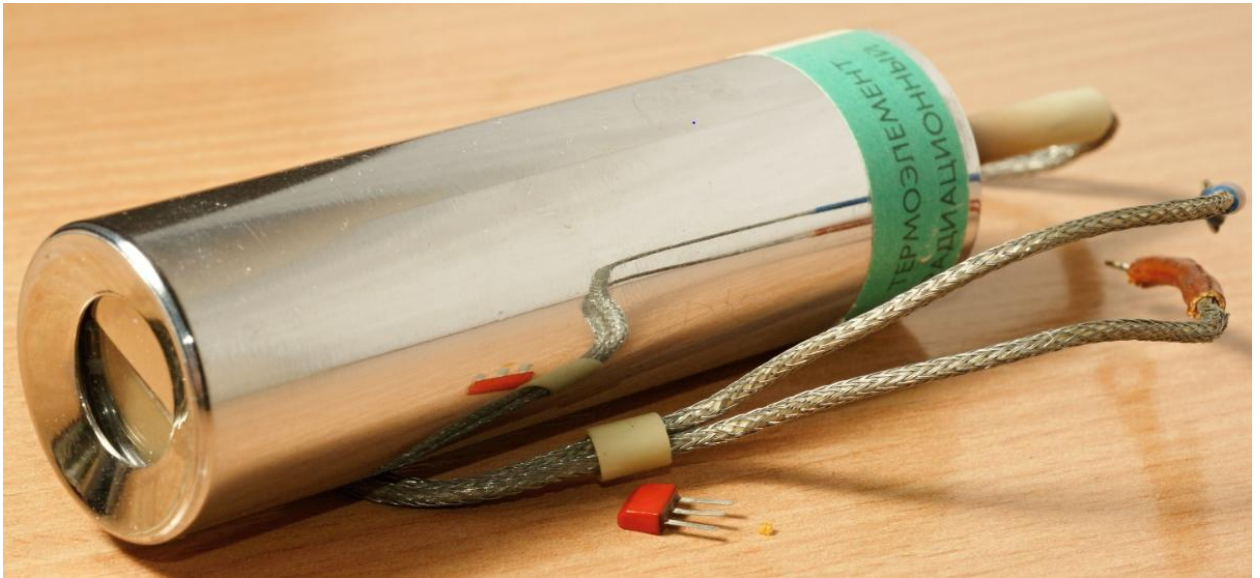


Рис. 2. Общий вид термоэлемента РТН – 30Г.

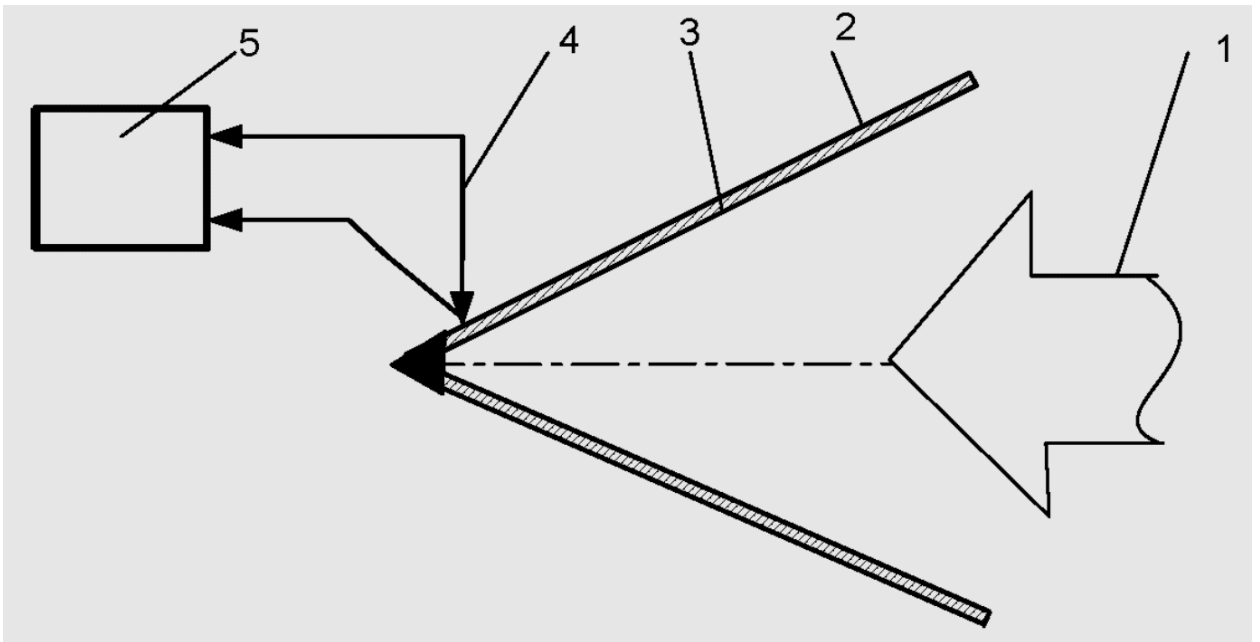


Рис.3. Принципиальная схема термоэлемента РТН – 30Г:

1 – направление падения излучения; 2 – приемная полость; 3 – черная эмаль;
4 – термоэлектрическая батарея; 5 – измерительная система.

Принципиальная схема измерительной системы представлена на рисунке 4.

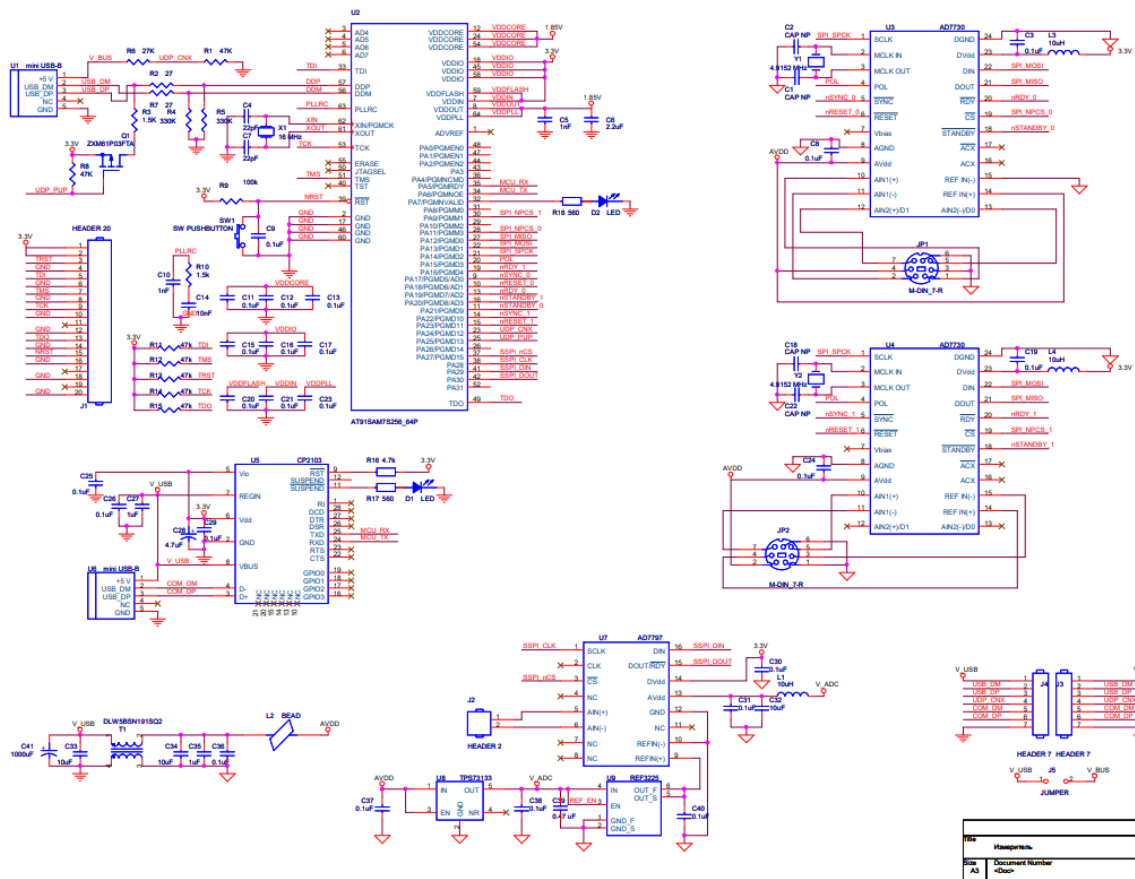


Рис. 4. Принципиальная схема измерительной системы.

Приемный элемент РТН – 30Г представляет собой термобатарею, составленную из последовательно соединенных высокочувствительных термопар, нанесенных на плату методом вакуумного напыления, и работает на основе преобразования энергии потока теплового излучения, падающего на приемную площадку термоэлемента в термо – ЭДС, пропорциональную величине потока излучения.

Термоэлемент РТН – 30Г обеспечивает выполнение следующих функций:

- измерение постоянных потоков оптического излучения сплошного спектра в спектральном диапазоне длин волн λ от 2 до 14 мкм и в диапазоне регистрируемых мощностей W от $8 \cdot 10^{-10}$ до $5,4 \cdot 10^{-3}$ Вт;
- формирование аналогового выходного сигнала для передачи в регистратор.

Ниже приведен результат оценочного расчета приращения мощности ИК-излучения ΔW , соответствующего изменению температуры излучающего

тела на $\Delta T = 0,001$ К и проведенного с использованием линеаризованного закона Стефана – Больцмана:

$$\Delta W(T) = 4\sigma S T_0^3 \Delta T = 5,54 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}, \quad (3)$$

где $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К) – постоянная Стефана – Больцмана; $S = 9 \cdot 10^{-6}$ мм² – площадь приемного окна термоэлемента; температура окружающей среды $T_0 = 300$ К. Полученное значение ΔW соответствует заявленному в паспорте термоэлемента РТН – 30Г диапазону регистрируемых мощностей. Тем самым представленный расчет подтверждает возможность использования указанного чувствительного элемента для фиксации параметров термоэмиссионных процессов, сопутствующих деформированию геоматериалов.

При проведении скважинных измерений терморadiометрический зонд должен иметь поперечные размеры, определяемые сечением скважины. В этом случае терморadiационный чувствительный элемент РТН – 30Г устанавливается в торцевой части корпуса зонда и направляется на забой скважины так, чтобы приемное окно элемента РТН – 30Г располагалось на расстоянии 3 – 8 мм от обнажения забоя. При размещении терморadiометрического зонда в скважине он должен снабжаться специальным приспособлением, задающим и фиксирующим его расположение.

6. Техника безопасности

Требования по безопасности эксплуатации датчика – зонда терморadiационной эмиссии соответствуют ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» и положениям отраслевых нормативно-правовых актов в сфере промышленной, экологической безопасности и охраны недр.

7. Подготовка к проведению измерений

7.1. Получение предварительной инженерно-геологической информации

Получение предварительной инженерно – геологической и геофизической информации требуется для разработки эффективной схемы расположения датчиков – зондов термоэмиссии в обследуемом участке горного массива. Необходимой априорной информацией в этом случае являются:

- 1) данные о наличии и расположении источников электропитания и о местах прокладки электрокабельного оборудования;
- 2) данные о топологических особенностях вмещающего горные выработки обследуемого участка породного массива (по данным инструментальных наблюдений);
- 2) зарисовки геологических нарушений с указанием их параметров;
- 3) данные геофизических исследований по выявлению зон с различными прочностными характеристиками;
- 4) выкопировка с плана горных работ участка с нанесением зон различной прочности, выявленных на основании анализа геолого-геофизической информации.

7.2. Построение тарировочных кривых

Перед проведением непосредственных измерений в породном массиве проводится тарировка изменений показаний терморациометрического зонда по изменениям напряжений в образце, отобранном из обследуемого участка горной выработки. Для этого с использованием прессового оборудования проводятся серии по одноосному деформированию образцов горной породы, отобранных на обследуемом участке породного массива, с совместной регистрацией изменений нагрузки и параметров термоэмиссии. К образцу прикладывается ступенчатая нагрузка с постоянным приращением ΔP_i , пересчитываемая в изменения первого инварианта напряжений в нем $\Delta \Pi_i = \Delta P_i / S$. При этом для каждого ΔP_i измеряются «скачки» уровней выходных сигнала (В) терморациационного зонда ΔU_i . Затем строится график тарировочной зависимости $\Delta U(\Delta \Pi)$, по которому оценивается значение

коэффициента пропорциональности между изменениями значений выходных сигналов терморадиометрического зонда и изменениям напряжений в образце A (В / Па). Пример тарировочной зависимости, полученной при испытаниях образца мрамора, представлен на рисунке 5.

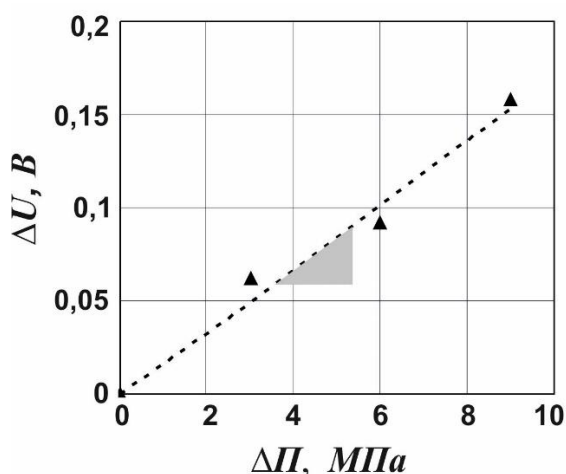


Рис. 5. Пример тарировочной зависимости $\Delta U(\Delta \Pi)$

Значение рассчитанной по представленной на рис. 5 зависимости $\Delta U(\Delta \Pi)$ коэффициента $A = \Delta U / \Delta \Pi$ составило $\approx 0,017$ В / Па. Такой способ оценки коэффициента A по данным тарировки соответствует теоретическим предпосылкам, изложенным в разделе 4, позволяет расшифровывать данные радиометрических измерений без определения теплофизических характеристик материала.

7.3. Организация измерительной станции

Для проведения измерений оборудуются измерительные станции. Станции должны располагаться в заранее определенных местах (см. п. 5.1.), соответствующих участкам породного массива с повышенной активизацией динамических проявлений горного давления. Организация измерительной станции для проведения измерений включает в себя бурение одного шпура диаметром 100 – 110 мм перпендикулярно стенке выработки. Глубина шпура определяется с учетом требуемой глубины проведения измерений, т.е. удалением очага критических деформаций обследуемого локального участка горного массива от стенки выработки (см. п. 5.1.).

Для проведения испытаний в шпуре закрепляются специально изготовленные металлические держатели для кабеля, протягивается кабель, размещается датчик-зонд термоэмиссии, устройства передачи информации и прочее оборудование, необходимое для проведения испытаний. Общая схема проведения терморadiометрических измерений на участке породного массива представлена на рисунке 6.

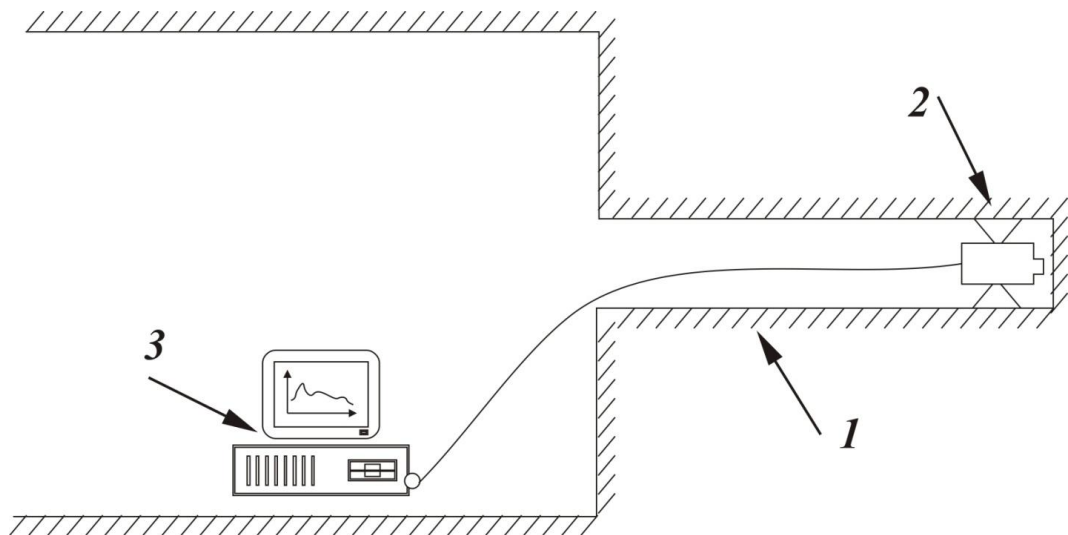


Рис. 6. Общая схема проведения терморadiометрических измерений
1 – шпур; 2 – датчик–зонд термоэмиссии с фиксирующими устройствами; 3 – регистрирующее устройство.

7.4. Подготовка средств измерений

Датчик – зонд термоэмиссии должен быть проверен и аттестован в соответствии со своей технической документацией. Кабели для передачи полученного аналогового сигнала в регистратор, досылочные штанги, соединительные муфты и фиксирующие устройства должны быть в исправном состоянии и не иметь дефектов.

8. Проведение измерений

1) Измерения проводят на измерительной станции, представляющей собой шпур, пробуренный перпендикулярно стенке выработки (см. рис. 6).

2) Непосредственно перед проведением измерений шпур необходимо прочистить (продуть).

3) Датчик – зонд термоэмиссии устанавливают на специальную подставку, фиксирующую его положение.

4) Подключают датчик – зонд термоэмиссии специальными соединительным кабелем к регистрирующему устройству (см. рис. 6).

5) Датчик – зонд терморadiационной эмиссии соединяют с досылочным устройством.

6) Датчик – зонд терморadiационной эмиссии при помощи досылочного устройства размещают вблизи забоя шпура (3 – 8 мм от поверхности забоя) так, чтобы приемник теплового излучения был направлен на забой (см. рис. 6). Положение датчика – зонда в сечении шпура фиксируется с помощью специальных приспособлений (см. рис. 6).

7) Шпур с датчиком – зондом терморadiационной эмиссии закрывается герметическим устройством, препятствующим попаданию пыли в зону измерения.

8) Регистрирующие устройство подключают к устройству передачи информации и источнику бесперебойного питания.

9) Во время проведения измерений регистрируемые изменения мощности потока излучения во времени $\Delta U(t_k)$ (в вольтах) передаются в компьютер в моменты $t_k = k \times \Delta t$, где $k = 0..N - 1$, Δt – заданный шаг по времени, $N = T/\Delta t$, T – продолжительность времени наблюдений.

10) Изменение напряженного состояния в зонах массива вблизи участков поверхности шпура, на которой измеряются изменения мощности потока излучения во времени, оцениваются по вариациям описывающих эти изменения функций $\Delta U(t)$.

11) По окончании измерений оборудование свертывают, шпур закрывают деревянной пробкой.

9. Обработка результатов измерений

Исходными данными терморадиометрической диагностики изменений напряженного состояния породного массива являются оцифрованные записи сигнала первичного детектора, характеризующие изменения мощности потока излучения во времени $\Delta U(t)$ (см. рис. 7).

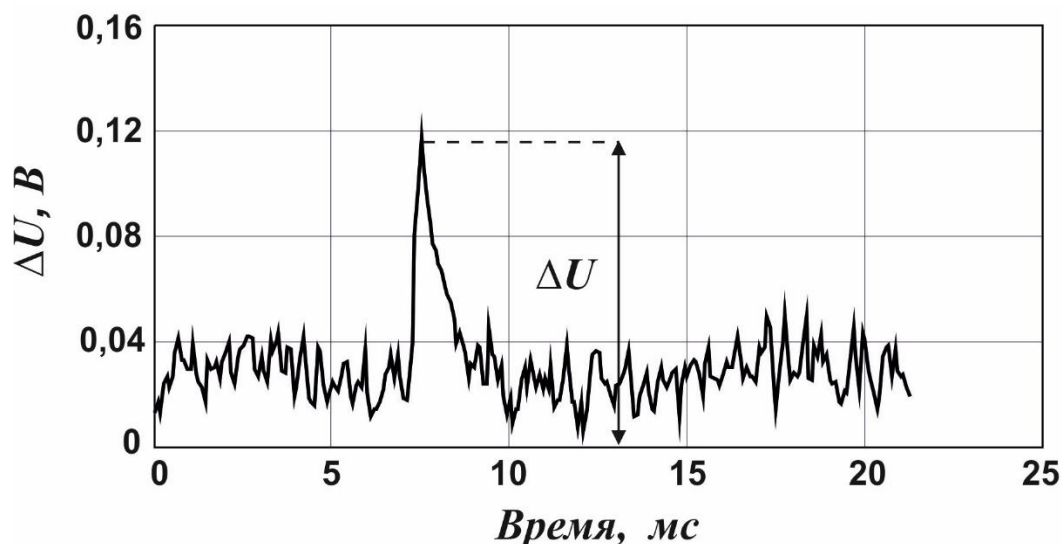


Рис. 7. Пример записи сигнала $\Delta U(t)$

При предварительной обработке результатов измерений учитывается наличие в полученных временных зависимостях как низкочастотных, так и высокочастотных составляющих. Низкочастотные составляющие в составе регистрируемой записи, в свою очередь, могут характеризовать как отклики на происходящие в массиве геомеханические процессы, так и процессы, обусловленные теплообменом. Однако размещение датчика – зонда у забоя шпура предполагает «квазиадиабатичность» режима проведения терморадиометрических измерений, что позволяет связать низкочастотную составляющую именно с изменениями напряжений на обследуемом локальном участке массива. Такие низкочастотные составляющие $\Delta U_w(t)$ функции $\Delta U(t)$ выделяются с использованием алгоритмов "скользящего" среднего. Выбор окна «скользящего среднего» обосновывается скоростью протекания предполагаемых изменений напряженного состояния.

При дальнейшем анализе данных измерений вместо $\Delta U(t)$ рассматривается функция $\Delta U_w(t)$.

Следующий этап обработки данных терморadiометрических измерений заключается в количественной оценке приращений напряжений $\Delta\Pi(t)$ по вариациям функций $\Delta U_w(t)$ по формуле (2).

Значимые изменения $\Delta U_w(t)$ (превышающие в 2 и более раза амплитуду шумовых (высочастотных) составляющих функции $\Delta U(t)$) за малый отрезок времени $\Delta t \leq 1..5$ с (см. рис. 7) пересчитываются в изменения первого инварианта напряжений $\Delta\Pi$, действующих на поверхности забоя шпура, на которую направлен датчик-зонд термоэмиссии, по формуле:

$$\Delta\Pi = (\Delta U_w(t + \Delta t) - \Delta U_w(t)) / A. \quad (4)$$

Значение коэффициента A определяется путем проведения тарировочных опытов (см. п. 7.2).

10. Представление результатов измерений

Результаты измерений представляют в виде графиков зависимости $\Delta\Pi(t)$. На рис. 8 представлен график приращения первого инварианта $\Delta\Pi(t)$, полученный путем обработки сигнала $\Delta U(t)$ (см. рис. 7) с учетом указаний п. 9.

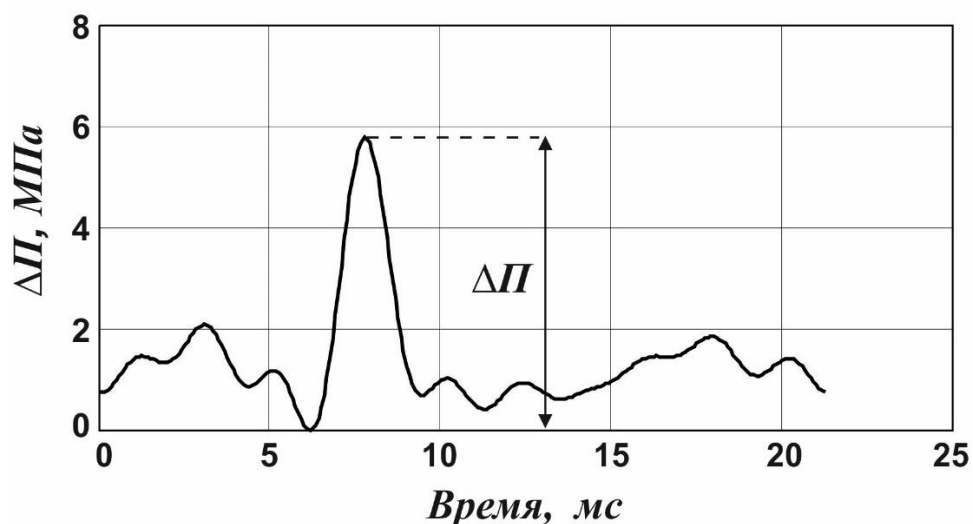


Рис. 8. Оценка приращения первого инварианта напряжений $\Delta\Pi(t)$ по данным терморadiометрии

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1) Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. Т. 2 – М.: Мир, 1969 – 863 с.
- 2) Оливер Д. Анализ полей напряжений с использованием теплового излучения / Экспериментальная механика. Кн. 2. Пер. с англ. / Под ред. А. Кобаяси. – М.: Мир, 1990.
- 3) Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Сов. радио, 1978 – 400 с.
- 4) Ильин А.С. Термоэлектрические приемники оптического излучения с пленочными и проволочными термопарами для прецизионных измерений // Метрология. – 2005 – № 11 – С. 19 – 30.

Приложение Д Информация о внедрении результатов работы на предприятиях

Справка об использовании результатов диссертационной работы (АО «ТРИАДА-ХОЛДИНГ»)



Триада-Холдинг
Акционерное общество

Исх. № 01-06

от "20" апреля 2026 г.

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы Блохина Дмитрия Ивановича
«Разработка экспериментально-теоретических основ и измерительных средств
терморadiометрической оценки геомеханического состояния породного массива»,
представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности
2.8.3 «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское
дело и геометрия недр».

Настоящей справкой подтверждаем, что «Методика оценки геомеханического состояния локальных участков породного массива на основе мониторинга его теплового поля», разработанная в рамках диссертационной работы «Разработка экспериментально-теоретических основ и измерительных средств терморadiометрической оценки геомеханического состояния породного массива», выполненной в НИТУ МИСИС, опробована и принята к использованию АО «ТРИАДА-ХОЛДИНГ» при осуществлении мониторинга напряженно-деформированного состояния элементов конструкций и грунтовых массивов при строительстве и эксплуатации подземных сооружений в условиях мегаполиса.

Генеральный директор,
проф., д.т.н.



А.А. Шилин



Триада-Холдинг

Россия, 117342, г. Москва, ул. Введенского, д. 1, стр. 1
Тел. (495) 234-16-10, 234-38-84, 956-15-04
E-mail: info@triadaholding.ru www.triadaholding.ru

Справка об использовании результатов диссертационной работы (ООО «УСМ-ИНЖИНИРИНГ»)



общество с ограниченной ответственностью
«УСМ-ИНЖИНИРИНГ»
телефон: +7(495) 565-37-47; e-mail: info@usm-eng.ru

Исх. № 105-04/26
от «21» апреля 2026 г.

СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы Блохина Дмитрия Ивановича
«Разработка экспериментально-теоретических основ и измерительных средств
терморadiометрической оценки геомеханического состояния породного массива»,
представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности
2.8.3 «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское
дело и геометрия недр».

Настоящей справкой подтверждаем, что «Методика оценки геомеханического состояния локальных участков породного массива на основе мониторинга его теплового поля», разработанная в рамках диссертационной работы «Разработка экспериментально-теоретических основ и измерительных средств терморadiометрической оценки геомеханического состояния породного массива», выполненной в НИТУ МИСИС, опробована ООО «УСМ-ИНЖИНИРИНГ» при выполнении работ по геотехническому мониторингу фундаментных конструкций и грунтов оснований строящихся и эксплуатируемых сооружений различного назначения.

Генеральный директор, к.т.н.

А.Ю. Бауков



Исполнитель: Супилин М.А., тел +7 (495) 565-37-47

249020, Калужская область, Боровский район,
индустриальный парк «Ворсино», 2-й Восточный проезд, вл. 8, стр. 1

Справка об использовании результатов диссертационной работы (ООО «УК «Талдинская»)

119330 Москва
ул. Дружбы 4, пом. XXII
8-499-703-35-02
ОГРН 1157746017285
ИНН 7729443758

Управляющая
компания
ТАЛДИНСКАЯ



СПРАВКА

об использовании результатов диссертационной работы Блохина Дмитрия Ивановича «Разработка экспериментально–теоретических основ и измерительных средств терморadiометрической оценки геомеханического состояния породного массива», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.8.3 «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр».

Настоящей справкой подтверждаем, что «Методика оценки геомеханического состояния локальных участков породного массива на основе мониторинга его теплового поля», разработанная Д.И. Блохиным в рамках диссертационной работы «Разработка экспериментально–теоретических основ и измерительных средств терморadiометрической оценки геомеханического состояния породного массива», выполненной в НИТУ МИСИС, содержит теоретически обоснованный и имеющий практическую ценность способ мониторинга напряженно-деформированного состояния угольных пластов и породных массивов при подземной разработке угля. Рассмотрена возможность практической реализации указанной методики при адаптации измерительных средств терморadiометрической диагностики к требованиям ПБ и МФСБ.

Генеральный директор
ООО «УК «Талдинская»



Ф.Н. Стрижко