

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

БЛОХИН Дмитрий Иванович

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

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

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

Научный консультант:

Доктор технических наук, профессор
Черепецкая Елена Борисовна

Общая характеристика работы

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.

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 аппаратурно-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 аппаратурное и методическое обеспечение терморadiометрического мониторинга геомеханического состояния массивов грунтов и горных пород.

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 назначений, 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., Иванова П.Н., Дружинскую Д.С., Сарану Е.П. и Максимовича И.Б.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена анализу существующих представлений о различных физических эффектах, сопутствующих процессам деформирования и разрушения геоматериалов, а также разработанных на основе указанных явлений методов контроля геомеханического состояния массивов грунтов и горных пород, подвергаемых техногенным и природным воздействиям.

В настоящее время в прикладной геомеханике и геотехнике широкое распространение

получили активные методы геоконтроля, такие как сейсмоакустические, электрометрические, радиоволновые и радиоизотопные. Тем не менее геофизические измерения, использующие широкий спектр пассивных сигналов акустических и электромагнитных излучений, также применяются достаточно эффективно.

Существенный вклад в обоснование использования пассивных 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., Асанова В.А., Винникова В.А., Вознесенского А.С., Дырдина В.В., Жукова В.С., Захарова В.Н., Козырева А.А., Кузьмина Ю.О., Курлени М.В., Лаврова А.В., Набатова В.В., Николенко П.В., Опарина В.Н., Пономарева А.В., Простова С.М., Соболева Г.А., Устинова К.Б., Черепецкой Е.Б., Шейнина В.И., Шкуратника В.Л., Яковицкой Г.Е., Ямщикова В.С.. Большой вклад также внесён зарубежными исследователями Carpinteri A., Kaiser J., Lockner D., Ma L., Mogi K., Ohtsu M., Wu L., Yixin Z. и др.

Несмотря на то что большинство из обозначенных методов характеризуются высоким уровнем теоретических разработок и соответствующего аппаратного и методического обеспечения, они обладают рядом ограничений. Например, эффективно применяемый на практике метод акустической эмиссии (АЭ) не позволяет явным образом связать количество регистрируемых акустических импульсов и вариации напряжений во времени, а информативность таких измерений напрямую зависит от точности установки пьезодатчиков и от качества подготовки поверхности, на которую они устанавливаются.

Преодолеть обозначенные трудности позволяет метод оценки изменений напряженного состояния объемов грунтов и горных пород по регистрируемым данным о вариациях интенсивности инфракрасного (ИК) излучения с их поверхности. Однако, как показал анализ научно-технической литературы, посвященной указанному методу, эксперименты по терморadiационным исследованиям механических процессов, несмотря на возросший интерес исследователей, находятся еще на ранней (постановочной) стадии развития, и говорить об их прецизионности и готовности к использованию в натурных условиях говорить 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 приведённые выше цель и задачи диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена разработке аппаратного и методического обеспечения бесконтактной терморadiометрической диагностики изменений напряженного состояния породных массивов.

В классических опытах Джоуля, Вебера и др., выполненных в середине 19 века, было показано, что при адиабатическом растяжении изотропного твердого тела температура понижается, а при сжатии возрастает. В литературе указанное явление на стадии линейного деформирования носит название «термоупругого» эффекта, а при уровне напряжений, превышающем предел упругости, – «термопластического» эффекта.

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

$$\Delta T = A_m \cdot T_0 \cdot \Delta I, \quad (1)$$

где T_0 и ΔT – начальная температура тела и ее изменение при нагружении, ΔI – изменение первого инварианта тензора напряжений, $A_m = \alpha / \rho \cdot C_p$ [1 / Па] (α – линейный коэффициент термического расширения, C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении, ρ – плотность материала).

Оценки ΔT , проведенные для геоматериалов по соотношению (1) для величин нагрузки, далеких от предельных, показывают, что величины рассчитываемых приращений имеют порядок 0,001 К. Однако следует учитывать, что расчет по формуле (1) производится в рамках модели однородной и изотропной среды, что, несомненно, снижает достоверность такого расчета. Для повышения надежности оценок изменения температуры деформируемого геоматериала ΔT предлагается модель изотропной среды с хаотически ориентированными трещинами. 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.

Для построения количественных оценок выбираем локальную систему координат так, чтобы ее начало совпадало с центром трещины. В случае осесимметричного напряженного состояния $\sigma_{33} < \sigma_{22} = \sigma_{11} \leq 0$ (Рисунок 1) при изменении напряженного состояния от σ_{11} , σ_{22} , σ_{33} до σ_{11} , σ_{22} , $\sigma_{33} + d\sigma_{33}$ ориентация трещины будет определяться углом φ между направлением оси σ_{33} и нормалью к трещине.

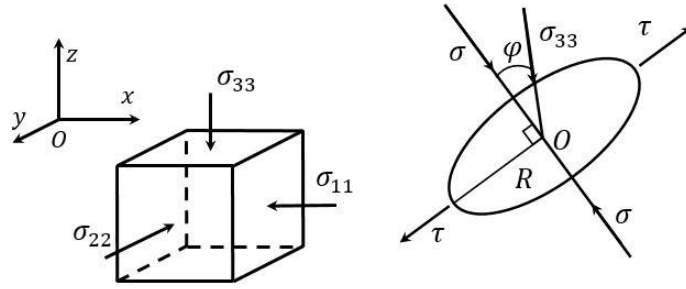


Рисунок 1 – Нагружение образца с трещиной

Считаем, что сдвиговые напряжения τ_f в устье трещины обусловлены действием силы сухого трения, которое задаётся уравнением Кулона:

$$\tau_f = \tau_0 + \mu|\sigma|, \quad (2)$$

где μ – коэффициент трения, σ – нормальное напряжение к поверхности трещины, τ_0 – сцепление. Если действующие на поверхность трещины сдвиговые напряжения $|\tau| > \tau_f$ (Рисунок 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 растёт.

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

$$\Delta q = \iint_{U,S} |\tau| dU(\tau_s) dS, \quad (3)$$

где $dU(\tau_s)$ – бесконечно малое относительное смещение берегов трещины, dS – элемент поверхности трещины, а интегрирование ведётся по всей поверхности трещины (Рисунок 1).

После интегрирования выражения (3) для среды, ослабленной закрытыми дисковыми трещинами, изотропно распределёнными по углам φ , при отсутствии сцепления ($\tau_0 = 0$) и изменении внешнего давления на $\Delta\sigma_{33}$, получим выражение:

$$\Delta q = \frac{16}{3E} \mu R^3 \frac{1-\nu^2}{2-\nu} |\sigma_{33} - \sigma_{11}| \Delta\sigma_{33} \cos^2 \varphi \sin 2\varphi, \quad (4)$$

где угол φ в силу осесимметричности распределения напряжения ($\sigma_{11} = \sigma_{22}$) изменяется в пределах $0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$ (см. рис. 1).

Рассматриваются условия, когда в образцах отсутствуют макротрещины, т. е. средний размер микротрещин R существенно меньше размеров образца L . В этом случае можно считать, что большая часть трещин располагается на расстоянии от свободной поверхности, существенно превышающем размер трещины, а каждую трещину в образце можно рассматривать как точечный источник тепла в бесконечной среде.

Считая, что i -я трещина, расположенная в точке (ξ, η, ζ) , является точечным источником энергии, изменение температуры ΔT_i в точке (x, y, z) в объеме образца в момент времени t при подвижке берегов в условиях одноосного сжатия будет задаваться выражением:

$$\Delta T_i(x, y, z, t) = \frac{16}{3E} R^3 \frac{1 - \nu^2}{2 - \nu} \mu \sigma_{33} \Delta \sigma_{33} \cos^2 \varphi \sin \varphi \sin 2\varphi \times \\ \times \frac{1}{c_p \rho} \frac{1}{(2\sqrt{\pi a^2(t-t_0)})^3} \exp \left[-\frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}{4a^2(t-t_0)} \right], 0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}, \quad (5)$$

где $a = k/(c_p \rho)$ – коэффициент температуропроводности; k – коэффициент теплопроводности материала.

Полученное выражение (5) 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:

$$\Delta T(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N \Delta T_i(x, y, z, t). \quad (6)$$

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. При этом процедура задания координат трещин исключала их попадание на поверхность образца, а также наложение трещин друг на друга.

На Рисунке 2 представлены прямые, являющиеся аппроксимациями зависимостей, рассчитанных по формулам (5) и (6) 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.

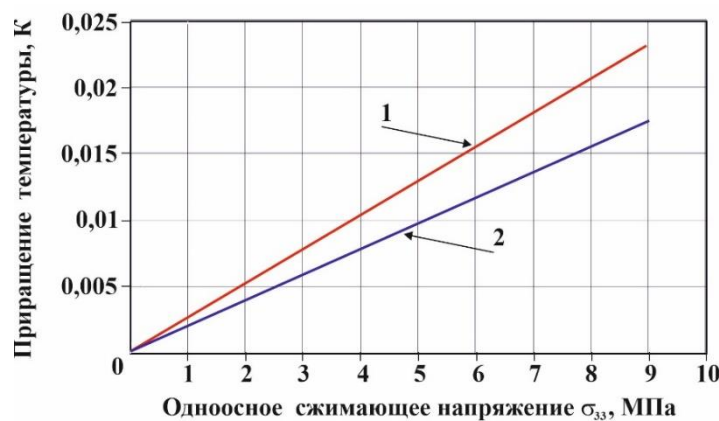


Рисунок 2 – Изменение приращений температуры ΔT образцов гранита (1) и известняка (2) от сжимающего напряжения σ_{33}

Подобные расчеты были произведены для модельных образцов такого же размера ($L = 0,1$ м), но с различными физико–механическими и теплофизическими параметрами. При этом число трещин N варьировалось от 10 до 150, а размер трещин R изменялся в диапазоне 0.1–0.5 мм. 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**.

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, 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. На Рисунке 3а представлен общий вид термоэлемента РТН–30Г, а на Рисунке 3б – его принципиальная схема.

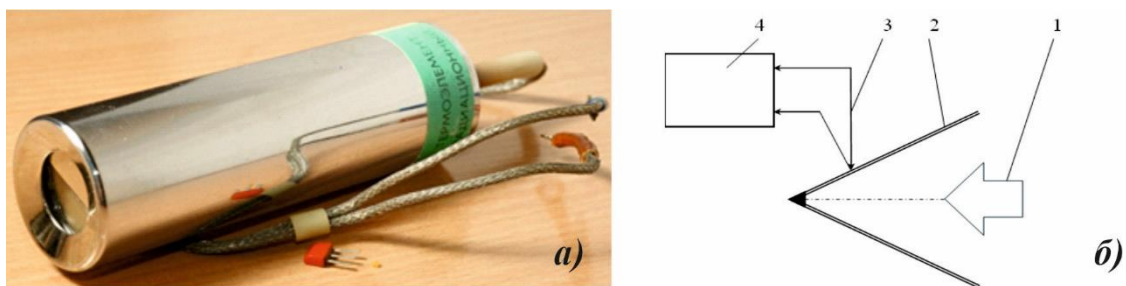


Рисунок 3 – Общий вид термоэлемента РТН–30Г (а) и его принципиальная схема (б).

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

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.

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:

$$\Delta W(T) = 4\sigma S T_0^3 \Delta T = 5,5 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}, \quad (9)$$

где $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана–Больцмана; $S = 9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ – площадь приемного окна термоэлемента; температура окружающей среды $T_0 = 300$ К. Полученное значение $\Delta W(T)$ практически 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, что позволило сформулировать **второе научное положение**.

Третья глава посвящена описанию результатов исследований изменений во времени параметров ИК–излучения образцов геоматериалов при монотонном изменении параметров нагружения в условиях одноосного сжатия.

Исследования проводились на экспериментальном стенде, позволяющем вести автоматизированную одновременную регистрацию механических, термоэмиссионных и акустоэмиссионных параметров при различных схемах и режимах нагружения. На Рисунке 4а представлен общий вид экспериментального стенда, а на Рисунке 4б его принципиальная схема.

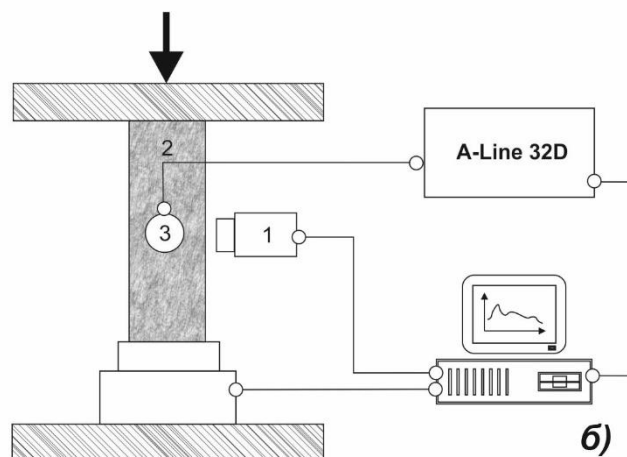
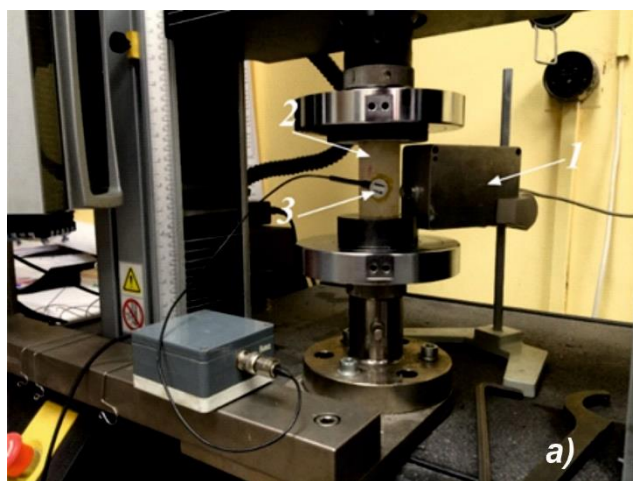


Рисунок 4 – Общий вид экспериментального стенда (а) и его принципиальная схема (б).

1 – ИК-радиометр; 2 – образец горной породы; 3 – преобразователь акустической эмиссии

ИК–радиометр (1) устанавливался 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 A-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.

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. Одноосное сжатие осуществлялось в двух различных режимах: при постоянной скорости нагружения ($d\sigma/dt = const$) (образцы первой группы) и при постоянной скорости продольной деформации ($d\varepsilon/dt = const$) (образцы второй группы).

При проведении описываемых экспериментов в режиме с постоянной скоростью нагружения образцов $d\sigma/dt = const$ величины $d\sigma/dt$ в отдельных опытах принимались равными от 0,05 МПа/с до 0,5 МПа/с. В опытах, в которых $d\varepsilon/dt = const$ значения скоростей изменения продольной деформации $d\varepsilon/dt$ варьировались в пределах от 0,005 до 0,02 мм/с.

Первая группа образцов исследовалась при $d\sigma/dt = const$. На Рисунке 5а 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 $d\sigma/dt = const = 0,35$ МПа/с. На Рисунке 5б приведена соответствующая диаграмма « $\sigma - \varepsilon$ », полученная в ходе описываемого эксперимента.

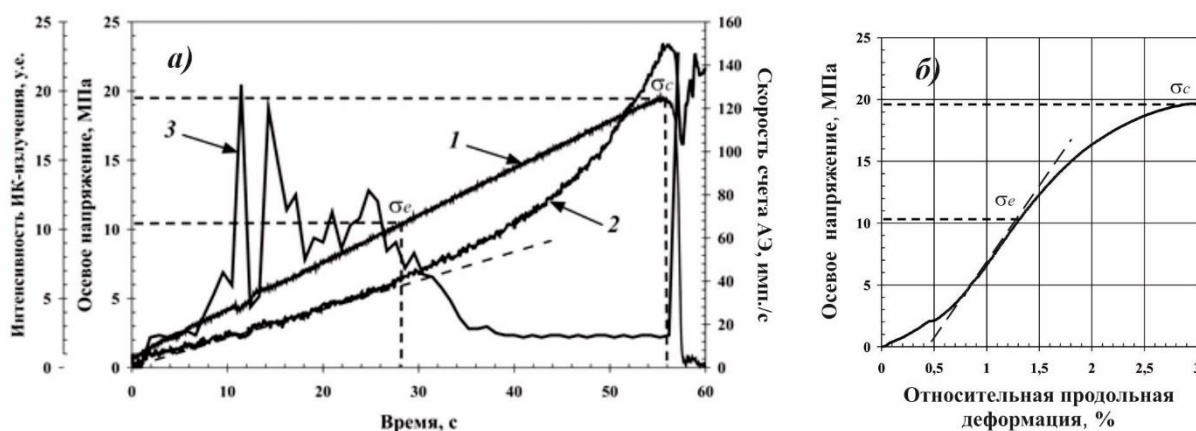


Рисунок 5 – Зависимости осевого напряжения $\sigma(t)$ (1), интенсивности ИК–излучения $V_w(t)$ (2) и скорости счета АЭ $\dot{N}(t)$ (3) от времени (а) и зависимость осевого напряжения от относительной продольной деформации (б) при $d\sigma/dt = const = 0,35$ МПа/с

Анализируя зависимость $V_w(t)$ (Рисунок 5а, 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 5а, зависимость 1). Указанное значение σ , как видно из соответствующей диаграммы « σ – ε » (Рисунок 5б), соответствует пределу упругости σ_e материала образца. 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. 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 5а) 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 (рис. 6а) позволяют осуществлять «привязку» участков с различным поведением значений $\dot{N}(t)$ к различным стадиям деформирования образца. На Рисунках 6а и 6б для одного из опытов представлены полученная зависимость $\dot{N}(t)$ и соответствующая диаграмма « σ – ε » при $d\sigma/dt = \text{const} = 0,2$ МПа/с.

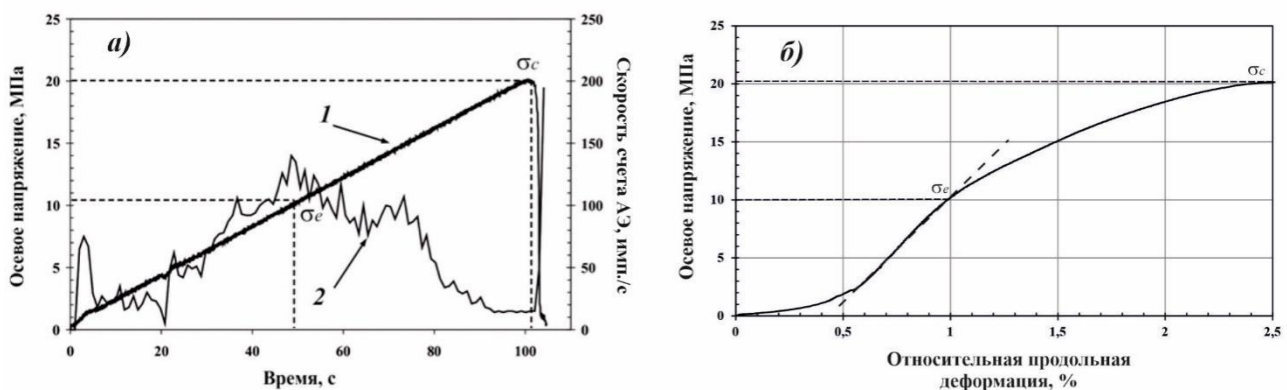


Рисунок 6 – Зависимости осевого напряжения $\sigma(t)$ (1) и скорости счета АЭ $\dot{N}(t)$ (2) от времени (а) и зависимость осевого напряжения от относительной продольной деформации (б) при $d\sigma/dt = 0,2$ МПа/с

Рассмотрим зависимость $\dot{N}(t)$ (зависимость 2, Рисунок 6а) при монотонном возрастании нагрузки во времени, показанном на том же рисунке (зависимость 1, Рисунок 6а). 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 $(0,4 \dots 0,6) \cdot \sigma_c$. Далее начинается второй участок возрастания скорости счета АЭ, в пределах которого $\dot{N}(t)$ достигает максимальных значений в конце зоны линейно – упругого деформирования (см. Рисунки 6а, 6б). 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, поскольку при таких скоростях нагружения требование адиабатичности процесса уже не выполняется. Так, на Рисунке 7 на графиках зависимостей интенсивности ИК–излучения от нагрузки, полученных при испытаниях со скоростями нагружения 0,2 МПа/с и 0,1 МПа/с, появляется «горизонтальный» участок в зоне упругих деформаций, соответствующий интервалу нагрузки, при котором теплообмен с окружающей средой «зашумляет» изменения температуры образца за счет термомеханических процессов.

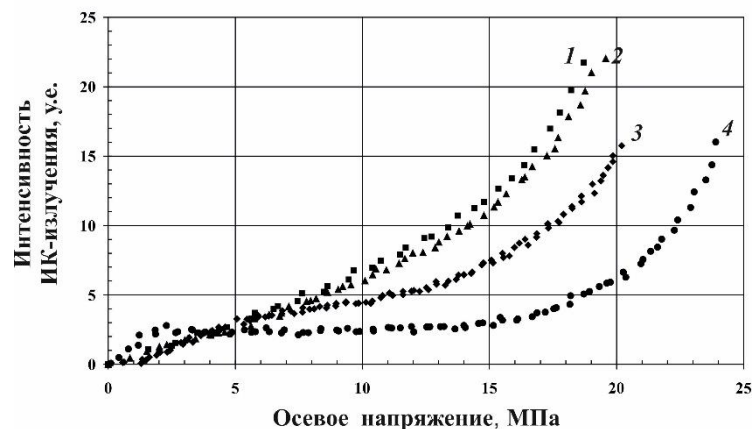


Рисунок 7 – Зависимости интенсивности ИК–излучения V_w от осевого напряжения σ при различных скоростях нагружения: 1 – $d\sigma/dt = \text{const} = 0,5$ МПа/с; 2 – $d\sigma/dt = \text{const} = 0,35$ МПа/с; 3 – $d\sigma/dt = \text{const} = 0,2$ МПа/с; 4 – $d\sigma/dt = \text{const} = 0,1$ МПа/с

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 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. Данный факт указывает на необходимость комплексирования результатов ИК– и акустоэмиссионных измерений для повышения надежности оценки изменений напряженно–деформированного состояния геоматериалов. Сделанные выводы позволили сформулировать **третье научное положение**.

Вторая группа образцов испытывалась в условиях одноосного сжатия при постоянной скорости продольной деформации $d\varepsilon/dt = \text{const}$. 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 8 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.

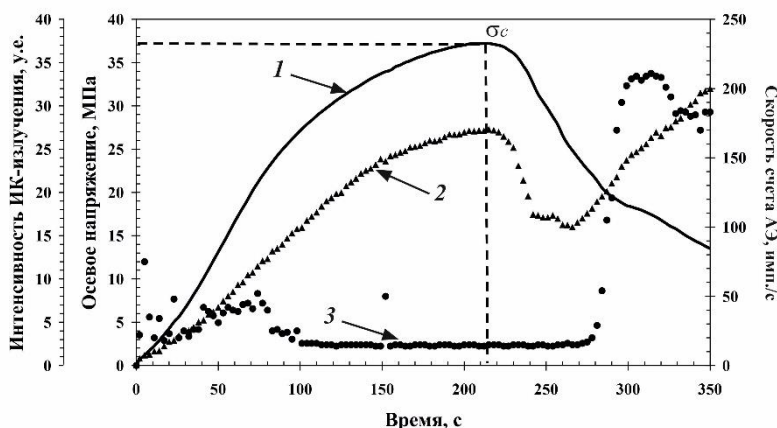


Рисунок 8 – Зависимости осевого напряжения $\sigma(t)$ (1), интенсивности ИК–излучения $V_w(t)$ (2) и скорости счета АЭ $\dot{N}(t)$ (3) от времени при $d\varepsilon/dt = \text{const} = 0,01$ мм/с.

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 9а, а соответствующая диаграмма « $\sigma - \varepsilon$ » - на Рисунке 9б.

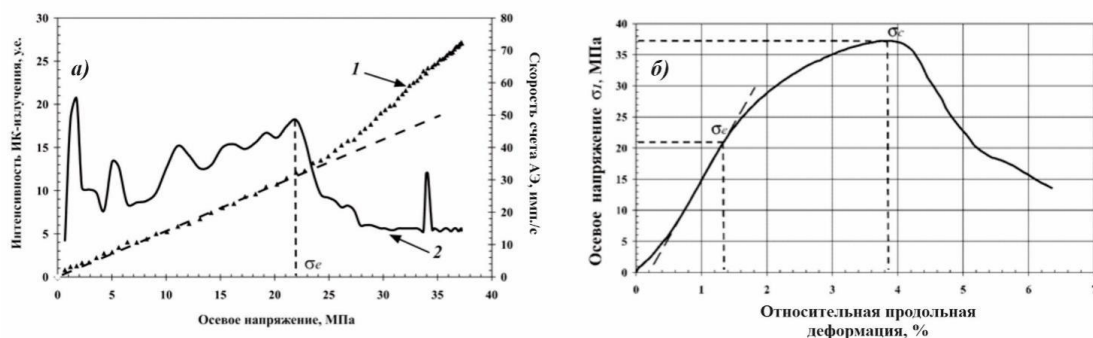


Рисунок 9 – Зависимости интенсивности ИК–излучения V_w (1) и скорости счета АЭ $\dot{N}$ (2) (а) от осевого напряжения и зависимость осевого напряжения от относительной продольной деформации (б) при $d\varepsilon/dt = \text{const} = 0,01 \text{ мм/с}$

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 «квазиадиабатичности» (зависимости 1 и 2 на Рисунке 7). Следовательно, точку «перегиба» на графике $V_w(\sigma)$ при $\sigma \approx 22 \text{ МПа}$ можно принять за предел упругости данного образца, что подтверждается анализом графика $\dot{N}(\sigma)$ (график (2) на Рисунке 9а) и диаграммы « $\sigma - \varepsilon$ » на Рисунке 9б.

Далее рассмотрены результаты исследований особенностей проявлений термоэмиссионных эффектов в «хрупких» геоматериалах при их одноосном сжатии. Испытания проводились на образцах известняка (кубики размером $40 \times 40 \times 40 \text{ мм}$). Одноосное сжатие осуществлялось в режиме постоянной скорости продольной деформации ($d\varepsilon/dt = \text{const}$). В качестве примера на Рисунке 10а представлены графики изменения осевого напряжения $\sigma(t)$ (1), интенсивности ИК – излучения $V_w(t)$ (2) и скорости счета АЭ $\dot{N}(t)$ (3) во времени при деформировании образца известняка в режиме одноосного нагружения при постоянной скорости изменения продольной деформации ($d\varepsilon/dt = \text{const} = 0,02 \text{ мм/с}$). На Рисунке 10б приведена соответствующая диаграмма « $\sigma - \varepsilon$ », полученная в ходе описываемого эксперимента.

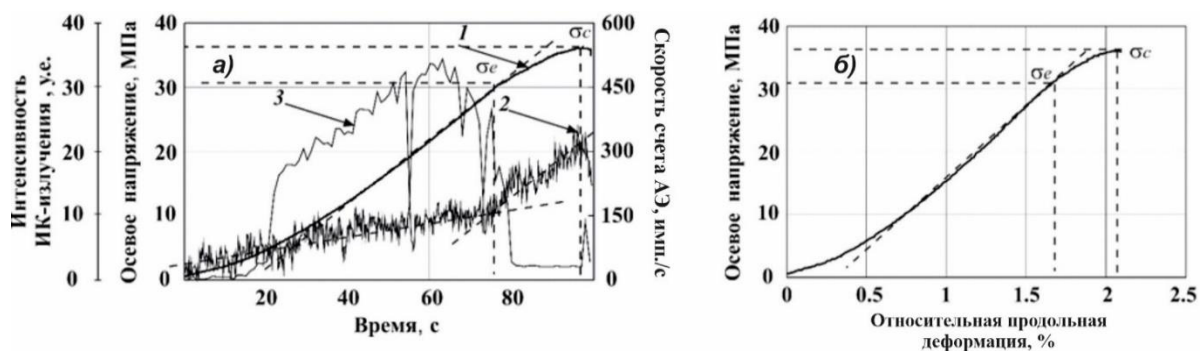


Рисунок 10 – Зависимости осевого напряжения $\sigma(t)$ (1), интенсивности ИК–излучения $V_w(t)$ (2) и скорости счета АЭ $\dot{N}(t)$ (3) от времени (а) и зависимость осевого напряжения от относительной продольной деформации (б) при испытаниях образца известняка при $d\varepsilon/dt = \text{const} = 0,02 \text{ мм/с}$

Анализируя зависимость $V_w(t)$ (Рисунок 10а, зависимость 2), можно сделать вывод, что ее возрастание становится существенно более интенсивным в достаточно явно фиксируемой точке $\sigma \approx 30$ МПа (Рисунок 10а, зависимость 2). Указанное значение σ , как видно из соответствующей диаграммы « σ – ε » (Рисунок 10б), соответствует пределу упругости σ_e материала образца. Предел прочности σ_c (Рисунок 10б) материала испытываемого образца также достоверно фиксируется по характерным и совпадающим во времени точкам перегиба графиков $\sigma(t)$ и $V_w(t)$ (Рисунок 10а).

Рассмотрим зависимость $\dot{N}(t)$ (зависимость 3, Рисунок 10а). 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 (зависимость 3, Рисунок 10а). 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 .

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**.

Далее рассмотрим исследования с использованием бесконтактных ИК–измерений проявлений, описываемых термоэмиссионных эффектов в образцах структурно-неоднородных горных пород с различной влажностью в условиях одноосного сжатия.

Испытания проводились на образцах известняка (параллелепипеды высотой 50 мм и с квадратным сечением размером 25×25 мм) с различной степенью водонасыщения. Одноосное сжатие осуществлялось в режиме постоянной скорости продольной деформации ($d\varepsilon/dt = \text{const}$).

В качестве примера на Рисунке 11а 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 11б соответствующие диаграммы « σ – ε ».

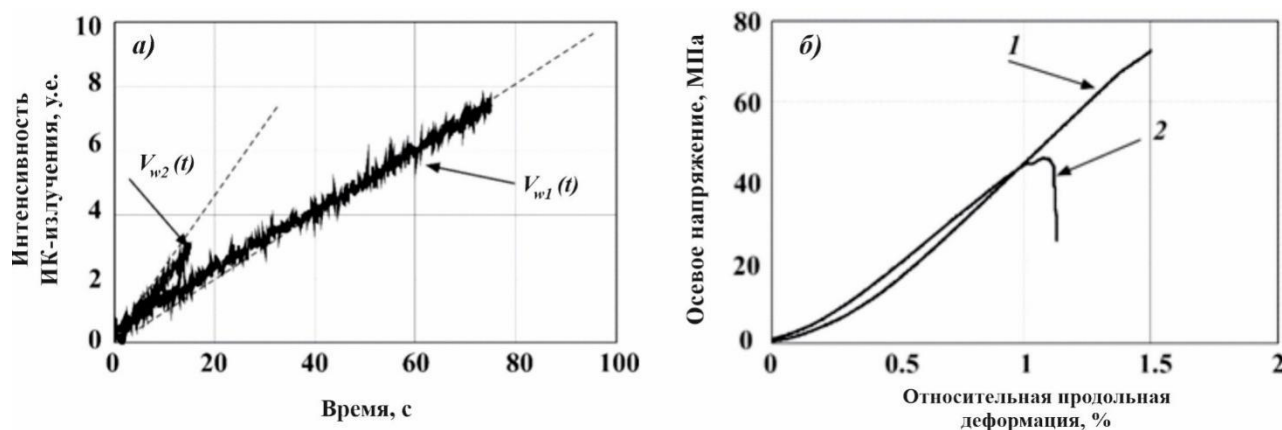


Рисунок 11 – Зависимость интенсивности инфракрасного излучения от времени для «сухих» $V_{w1}(t)$ и водонасыщенных $V_{w2}(t)$ образцов известняка (а) и соответствующие зависимости осевого напряжения от относительной продольной деформации для «сухого» (1) и водонасыщенного (2) образцов известняка (б) при $d\varepsilon/dt = \text{const} = 0,01$ мм/с

Отметим, что 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 11а, 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 указывает на то, что изменения как теплофизических, так и физико-механических характеристик образцов под влиянием водонасыщения являются основным фактором, обуславливающим наблюдаемый термомеханический эффект. Полученные результаты демонстрируют однозначную зависимость характера графиков $V_w(t)$ от степени водонасыщенности испытываемых образцов, что обуславливает необходимость учета выявленной закономерности при идентификации изменений во времени напряженного состояния геоматериалов в реальных горно-геологических условиях.

Четвертая глава посвящена исследованиям изменений во времени параметров ИК-излучения образцов геоматериалов при периодическом нагружении в условиях одноосного сжатия.

Первый этап этого раздела представлен экспериментами, в которых образцы горных пород подвергались низкоамплитудным квазипериодическим воздействиям. Генерация таких воздействий осуществлялась с помощью маятникового нагрузочного устройства, специально сконструированного на основе стенда для испытания грунтов (Рисунок 12). Во время проведения испытаний проводилась одновременная регистрация параметров нагружения

образцов и интенсивности ИК–излучения.

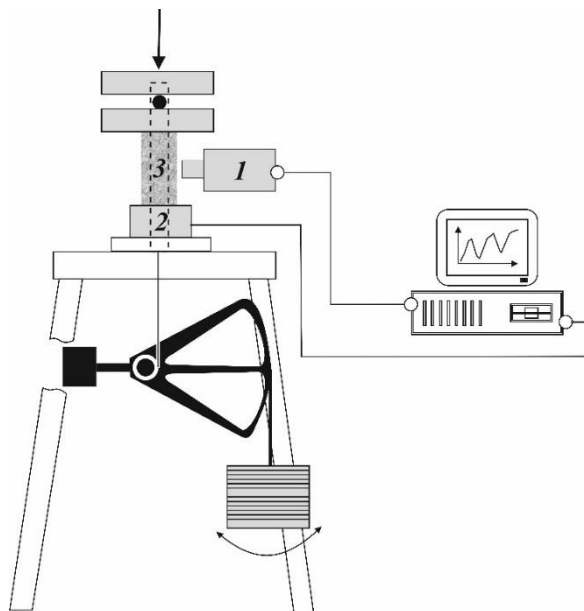


Рисунок 12 – Схема стенда для испытаний образцов геоматериалов при квазипериодических нагрузениях: 1 – ИК–радиометр, 2 – тензодатчик, 3 – образец горной породы.

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 13, на котором видно, что реальные результаты ИК–измерений обладают весьма сложной структурой.

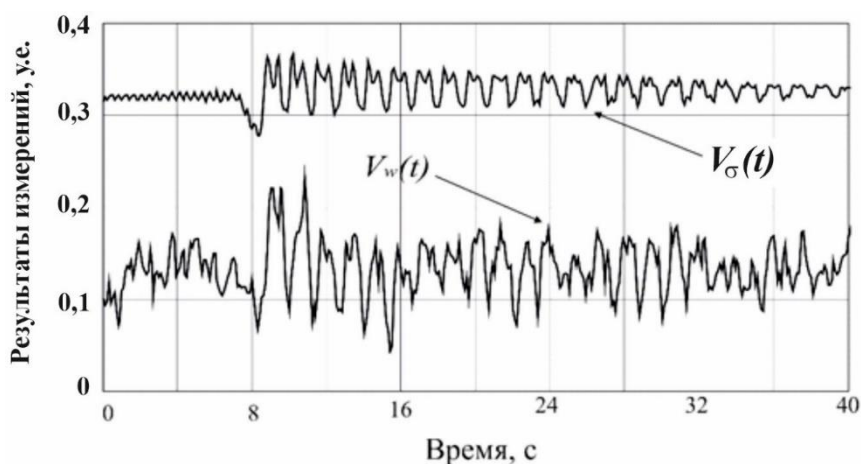


Рисунок 13 – Экспериментальные результаты измерений выходных сигналов датчика нагрузки $V_{\sigma}(t)$ (1) и ИК–радиометра $V_w(t)$ (2).

В зависимости $V_w(t)$, наряду с существенно нестационарной в данном эксперименте составляющей, непосредственно связанной с механическими процессами в образце, содержится относительно высокочастотная компонента, отражающая неизбежное наличие случайных аппаратурных и других «шумов». График функции $V_{\sigma}(t)$, характеризующий тот же процесс нагружения образца и поэтому также имеет нестационарный вид, но при этом он более гладкий. Очевидно, что по представленным на Рисунке 13 зависимостям оценить

степень идентичности $V_w(t)$ и "эталонного" сигналов без специальной обработки практически невозможно.

Для вычисления оценок изменений во времени напряжений $\sigma_w(t)$ и $\sigma(t)$ (МПа) соответственно по зависимостям $V_w(t)$ и $V_\sigma(t)$ использовались переходные коэффициенты, величины которых определялись по данным тарировки, проводившейся перед каждой серией экспериментов.

Для количественного описания экспериментальных записей и идентификации «полезной» информации привлекались методы спектрального анализа, основанные на Фурье– и вейвлет–преобразованиях. При этом выполнялась коррекция обрабатываемых временных последовательностей с целью удаления из них низкочастотных «трендов».

На Рисунке 14 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 15 и 16 адаптированные скалограммы с базовым вейвлетом Морле соответствующих зависимостей $\sigma_w(t)$ и $\sigma(t)$.

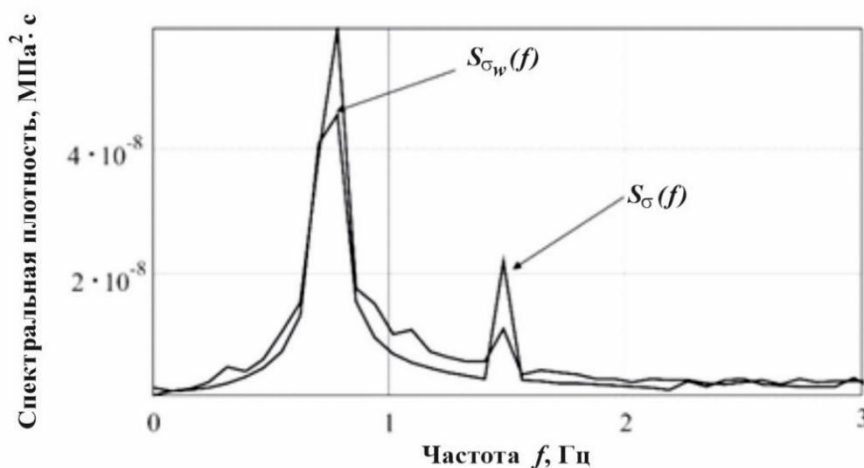


Рисунок 14 – Спектральные плотности $S_{\sigma_w}(f)$ и $S_{\sigma}(f)$ зависимостей $\sigma_w(t)$ и $\sigma(t)$, МПа²·с

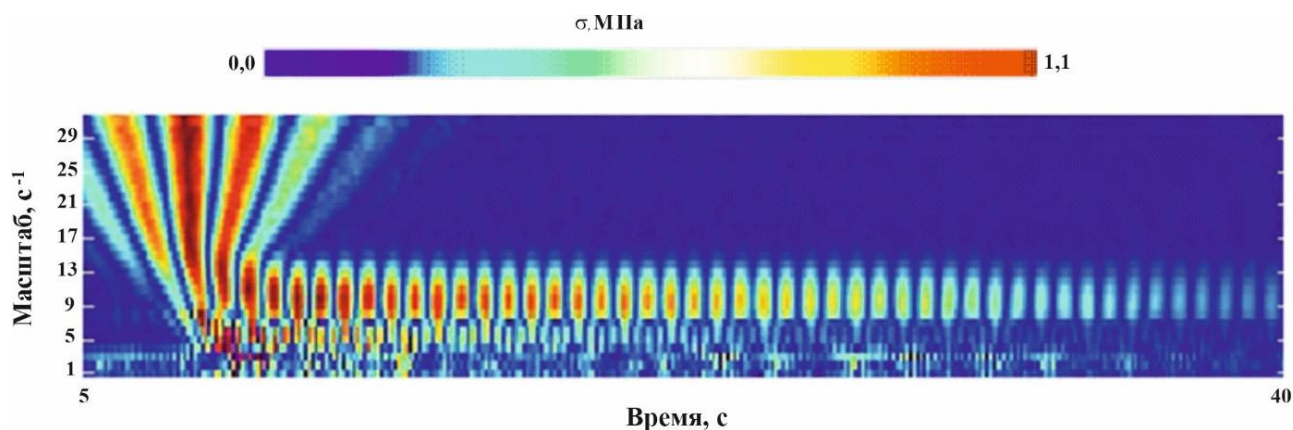


Рисунок 15 – Скалограмма (вейвлет–спектр) зависимости $\sigma(t)$ (интервал 5 – 40 с)

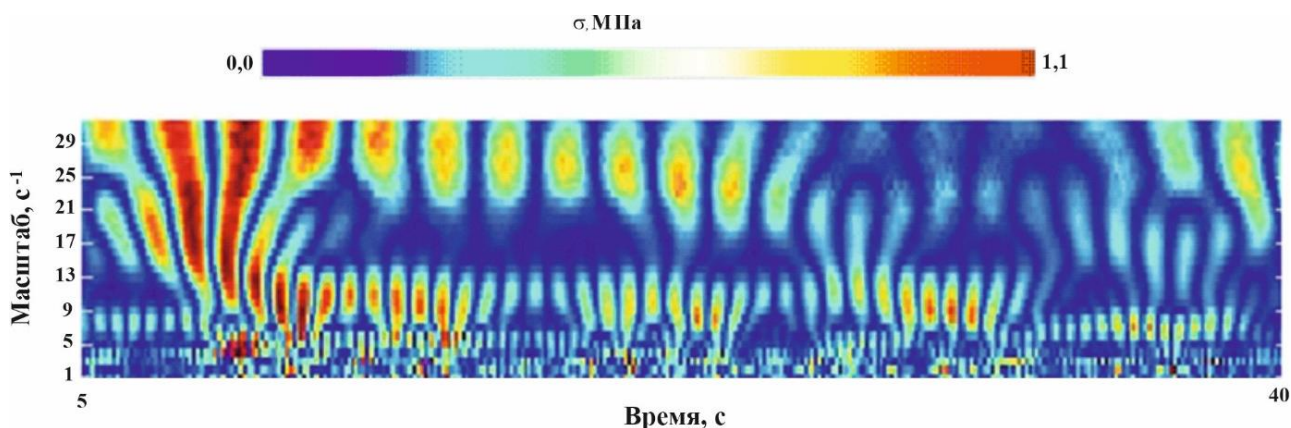


Рисунок 16 – Скалограмма (вейвлет–спектр) зависимости $\sigma_w(t)$ (интервал 5 – 40 с)

Графики представленных на Рисунке 14 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.

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:

$$f_i = \frac{f_c}{a_i \Delta t} \quad (10).$$

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 – $a \approx 10$ с⁻¹; для частоты $f_2 = 1,5$ Гц – $a \approx 5$ с⁻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 терморациометрических 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.

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 «нагрузки–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.

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. Известно, что в процессе циклического нагружения геоматериалов происходят значительные изменения их механического состояния, фиксируемые в т.ч. и по изменениям характера зависимостей « $\sigma - \varepsilon$ », соответствующих различным циклам. Так, например, в экспериментах на одноосное сжатие образца горной породы деформационный «эффект памяти» проявляется в виде резкого изменения угла наклона кривой « $\sigma - \varepsilon$ » при достижении напряжением σ своего максимального испытанного ранее значения σ^I , при этом процесс деформирования носит линейный характер при напряжениях, меньших этого значения.

Также следует отметить еще две характерные особенности видоизменения кривых « $\sigma - \varepsilon$ » для геоматериалов, проявляющиеся при их циклическом деформировании: изменение величины приращения остаточных деформаций и уменьшение модуля деформации. Указанные особенности находят отражение и в изменениях параметров полей различной физической природы (акустическая, электромагнитная эмиссия и др.), сопутствующих процессам изменения напряженного состояния геоматериалов. Возможности эффективного использования эмиссионных откликов такого рода в геомеханических исследованиях широко представлена в соответствующей научно–технической литературе. 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. 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 17 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». В данном эксперименте число циклов «нагрузка – 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 17) 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 .

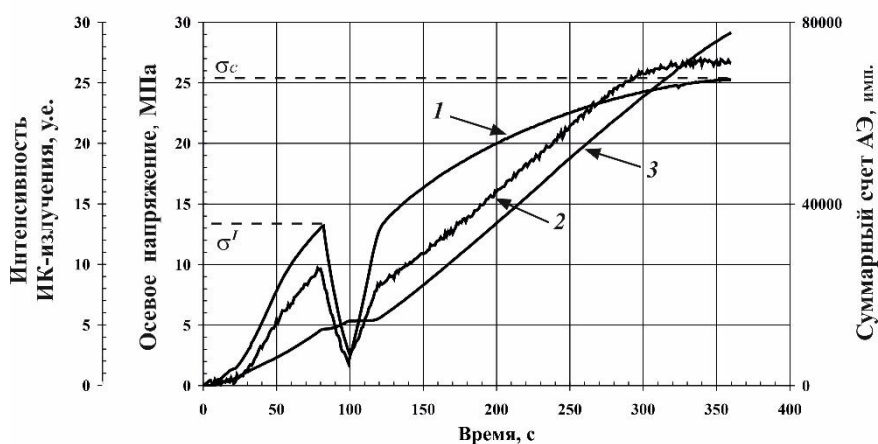


Рисунок 17 – Зависимости осевого напряжения $\sigma(t)$ (1), интенсивности ИК–излучения $V_w(t)$ (2) и суммарного счета АЭ $N(t)$ (3) от времени при $d\varepsilon/dt = \text{const} = 0,01$ мм/с

На Рисунке 18 приведены зависимости суммарного счета АЭ $N(\sigma)$ и интенсивности ИК–излучения $V_w(\sigma)$ от осевого напряжения σ , а на Рисунке 19 – зависимости осевого напряжения $\sigma(\varepsilon)$, суммарного счета АЭ $N(\varepsilon)$ и интенсивности ИК–излучения $V_w(\varepsilon)$ от относительной продольной деформации.

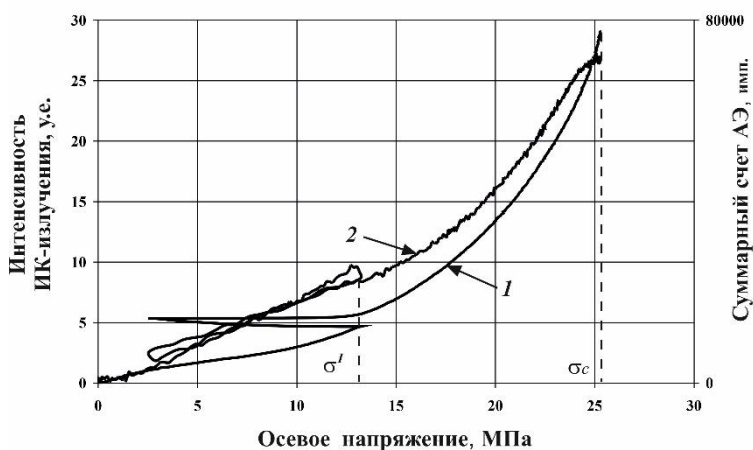


Рисунок 18 – Зависимости суммарного счета АЭ $N(\sigma)$ (1) и интенсивности ИК–излучения $V_w(\sigma)$ (2) от осевого напряжения σ

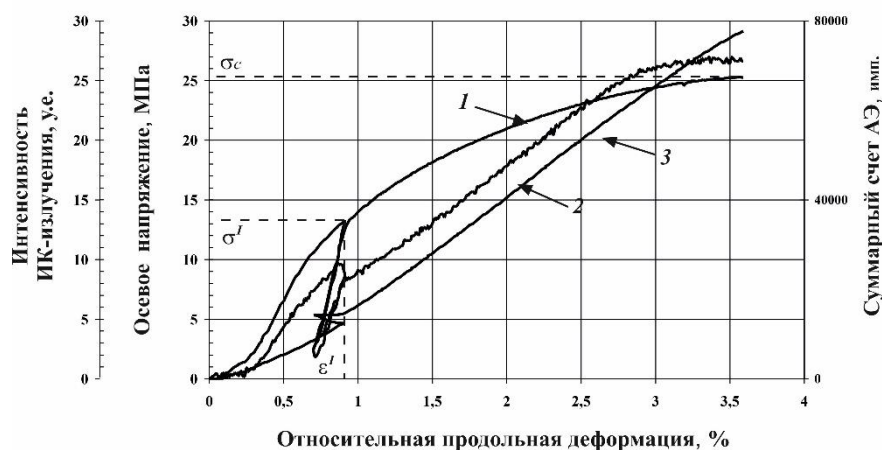


Рисунок 19 – Зависимости осевого напряжения $\sigma(\varepsilon)$ (1), суммарного счета АЭ $N(\varepsilon)$ (2) и интенсивности ИК–излучения $V_w(\varepsilon)$ (3) от относительной продольной деформации

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 18), но и соответствующее значение относительной продольной деформации ε^I (Рисунок 19).

Показано, что при выбранном режиме испытаний как акустоэмиссионные, так и терморadiометрические измерения оказываются эффективными для диагностики предыстории процессов деформирования. Однако, как установлено выше, информативность акустоэмиссионных измерений понижается при увеличении скорости нагружения, а терморadiометрические измерения – наоборот, при малых скоростях нагружения могут не давать информации о механических процессах в образце вследствие влияния теплообмена. Поэтому целесообразным представляется комплексный подход к диагностике предыстории нагружения, основанный на совместных измерениях механических параметров, ИК– и АЭ–сигналов.

Следующая серия опытов посвящена испытаниям образцов каменной соли на многоцикловое высокоамплитудное циклическое нагружение. 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.

Отметим, что σ_{max} значительно превосходит предел упругости $\sigma_{max} \approx 10 - 12$ МПа, характерный для исследуемых образцов каменной соли при однократном испытании. На Рисунке 20 приведены кривые изменения во времени осевого напряжения $\sigma(t)$, относительной продольной деформации и интенсивности ИК-излучения $V_w(t)$ при деформировании образца в условиях последовательных циклов “нагружения – разгрузки” ($|d\varepsilon/dt| = \text{const} = 3$ мм/мин) при постоянном значении амплитуды нагрузки. Разрушение образца при указанной амплитуде изменения напряжений произошло на 8 цикле.

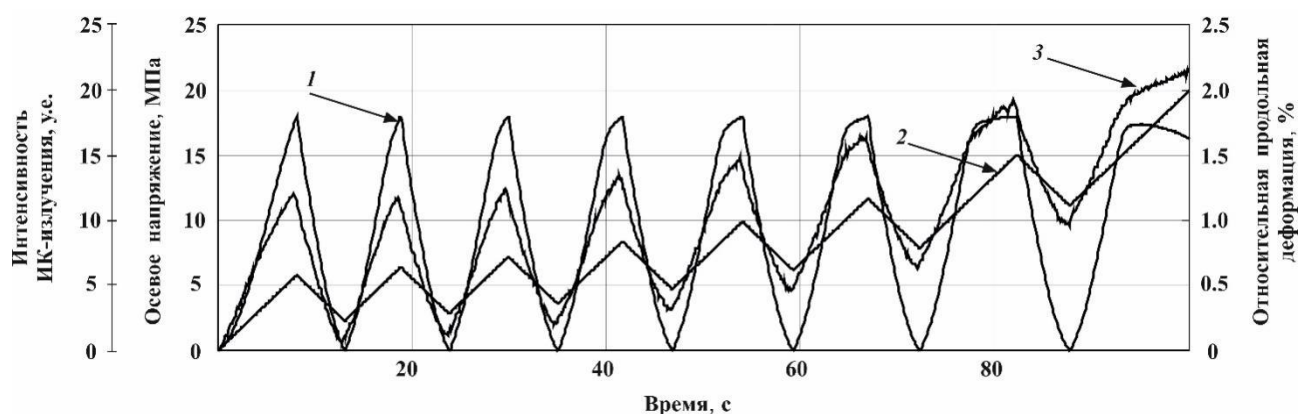


Рисунок 20 – Зависимости осевого напряжения $\sigma(t)$ (1), относительной продольной деформации (2) и интенсивности ИК-излучения $V_w(t)$ (3) от времени при $|d\varepsilon/dt| = \text{const} = 3$ мм/мин.

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 21, где отчетливо прослеживается уменьшение “раскрытия” гистерезисной петли на втором цикле по сравнению с первым циклом “нагружение – 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.

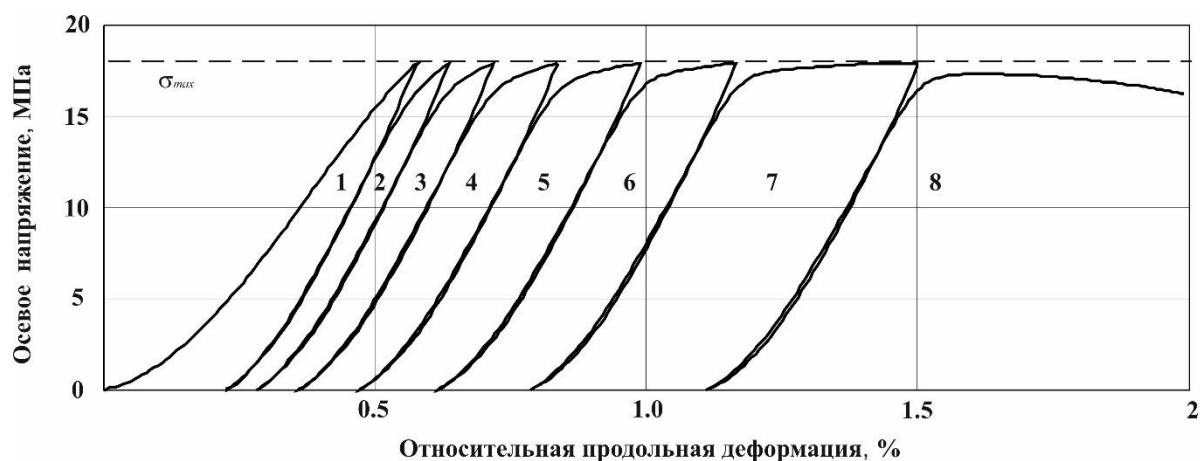


Рис. 21. Диаграмма « $\sigma - \varepsilon$ »: 1 – 8 — номера циклов

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 22 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_{wn} (2), оцененных по кривой $V_w(t)$.

Указанные зависимости 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_{wn} .

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} .

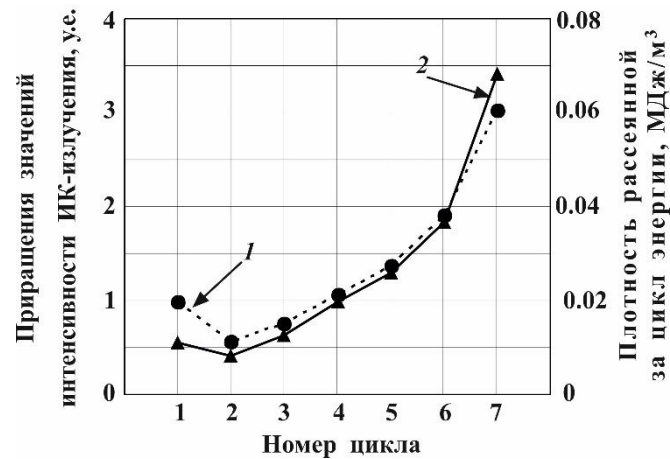


Рисунок 22 – Зависимости значений объемной плотности рассеянной за цикл энергии W_n (1) и приращений значений интенсивности теплового излучения ΔV_{w_n} (2) от номера цикла “нагрузка – разгрузка” n

Приведенная на Рисунке 23а зависимость $V_w(t)$ позволяет детально отразить стадии изменения механического состояния циклически деформируемого образца. Анализируя эту зависимость, 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 $\sigma(t)$ (Рисунке 23б) фиксируется переход процесса деформирования из линейной в нелинейную стадию.

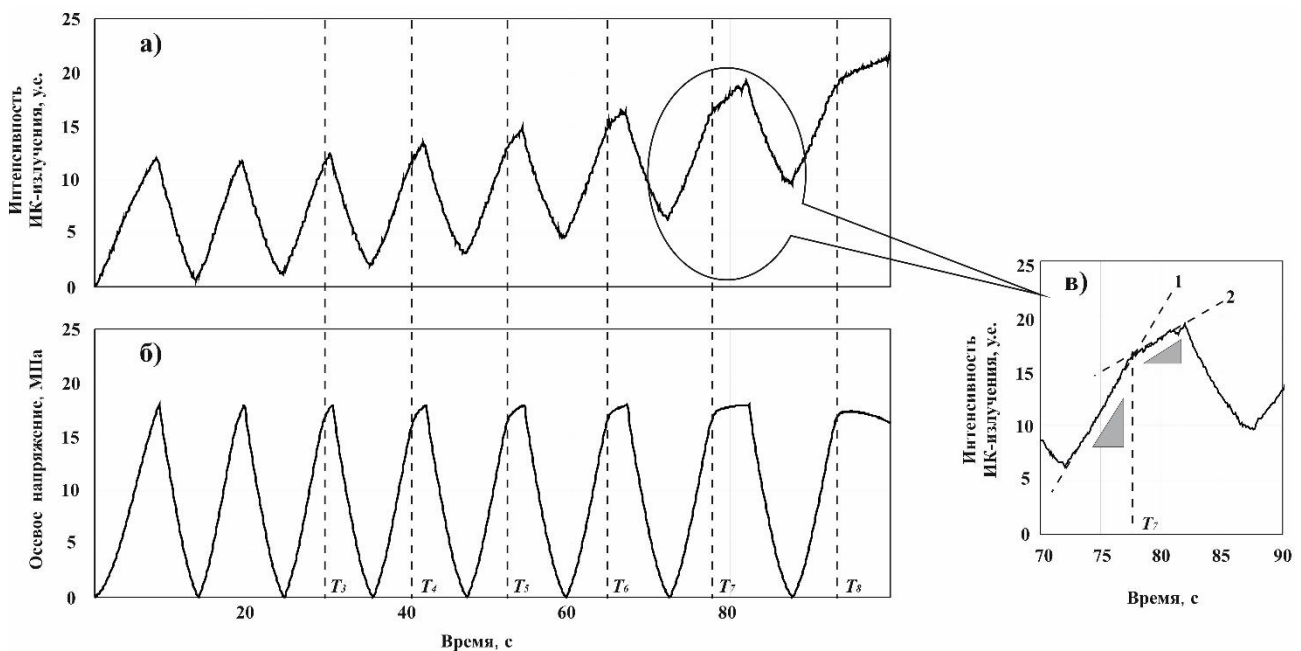


Рисунок 23 – Зависимости интенсивности ИК-излучения $V_w(t)$ (а) и осевого напряжения $\sigma(t)$ (б) с указанием моментов времени, соответствующих переходам деформирования образца в нелинейную стадию, и иллюстрации способа их определения (в)

Наиболее отчетливо трансформации зависимостей $V_w(t)$ и $\sigma(t)$ проявляются на последних циклах деформирования, предшествующих разрушению образца. В качестве примера рассмотрим на Рисунке 23в 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 23а), совпадает со значением момента времени, в котором фиксируется трансформация зависимости $\sigma(t)$ (Рисунок 23б). 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.

Для подтверждения данного предположения рассмотрим зависимости $V_w(\sigma)$ (1) и $\varepsilon(\sigma)$ (2) для участка нагружения седьмого цикла (Рисунок 24). Зависимость $V_w(\sigma)$ достаточно точно аппроксимируется прямой при значениях σ_1 , соответствующих упругому деформированию (участок АВ). Существенное изменение характера зависимости $V_w(\sigma)$ наблюдается при приближении значений σ к σ_{max} . Здесь указанная зависимость приобретает явно нелинейный характер, обусловленный большей скоростью повышения температуры образца, чем на предыдущем этапе деформирования. Такой характер зависимости $V_w(\sigma)$ объясняется тем, что на участке АВ проявляется только “термоупругий”, а на участке ВС 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 21.

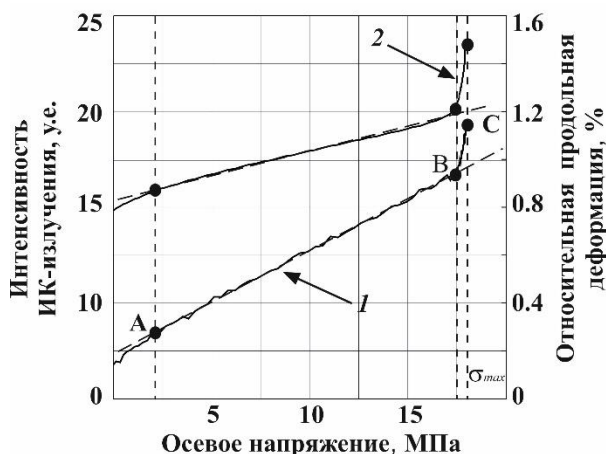


Рисунок 24 – Зависимости интенсивности ИК–излучения V_w (1) и относительной продольной деформации (2) от осевого напряжения σ , соответствующие этапу нагрузки на седьмом цикле деформирования образца

Представим на Рисунке 25 зависимость $V_w(\varepsilon)$, по которой визуально фиксируются точки, где на каждом цикле изменяется ее наклон, т. е. происходит переход к нелинейной стадии процесса деформирования.

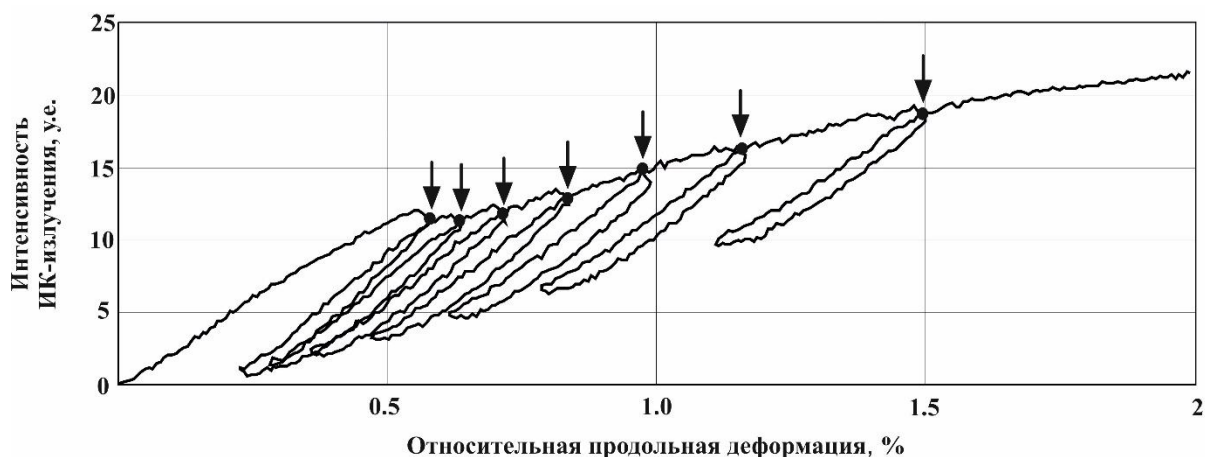


Рисунок 25 – Зависимость интенсивности ИК–излучения $V_w(\varepsilon)$ от относительной продольной деформации (стрелками указаны точки изменения наклона кривой на каждом цикле нагружения)

Для детализации и обоснования указанной причины трансформации кривых на Рисунке 26 для циклов с $n = 3-8$ приведены зависимости $\sigma(\varepsilon)$, характеризующие процесс деформирования в режиме нагружения, и соответствующие кривые $V_w(\varepsilon)$.

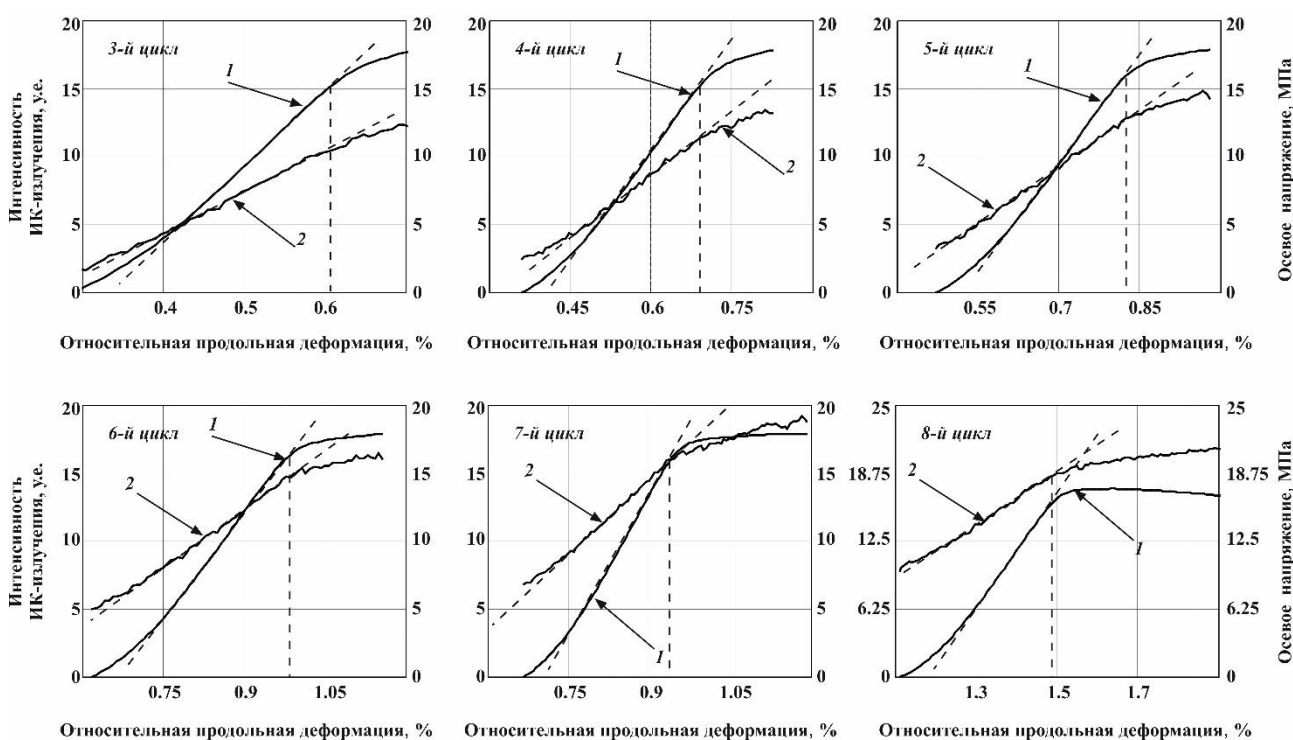


Рисунок 26 – Зависимости осевого напряжения $\sigma(\varepsilon)$ (1) интенсивности ИК–излучения $V_w(\varepsilon)$ (2) от относительной продольной деформации для участков нагружения, соответствующих циклам с $n = 3-8$

Точки перегиба на кривых $V_w(\varepsilon)$ (показанные стрелками на Рисунке 26) 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.

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

$$D = 1 - (E/E_0), \quad (11)$$

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.

На Рисунке 27а приведена зависимость модуля упругости $E = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon$, определяемого в соответствии с ГОСТ 28985-91 «Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии», от номера цикла нагружения, определяемая по графику $\sigma(\varepsilon)$, а на Рисунке 27б – зависимость изменения коэффициента $k = \Delta V_w/\Delta\varepsilon$, определяемого аналогичным образом по графику $V_w(\varepsilon)$.

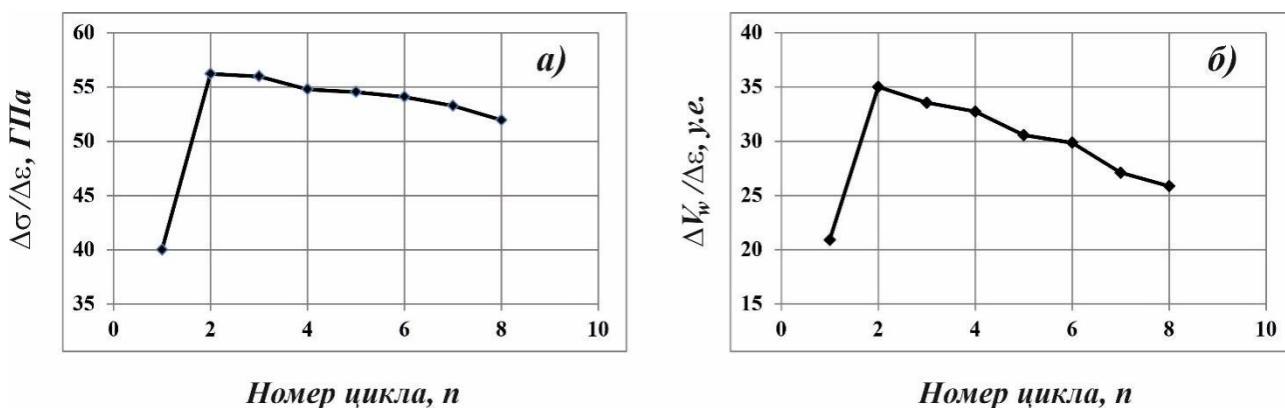


Рисунок 27 – Зависимости модуля упругости $E(n)$ (а) и коэффициента $k(n)$ (б) от номера цикла деформирования n

Как видно из Рисунка 27а, 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. Аналогичное ведет себя и коэффициент $k = \Delta V_w / \Delta \varepsilon$, зависимость которого от номера цикла n представлена на Рисунке 276.

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

Таким образом, результаты, полученные в третьей и четвертой главах, позволили сформулировать **пятое научное положение**.

В пятой главе описываются эксперименты, продолжающие изложенные выше исследования в направлении большего приближения лабораторных условий к условиям in – situ.

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.

Для знакопеременного нагружения объемов грунта был сконструирован лабораторный стенд (Рисунок 28), 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. 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.

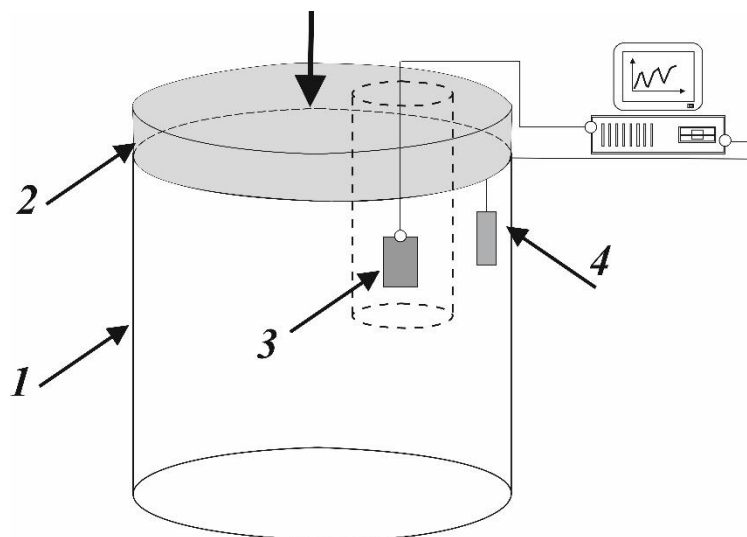


Рисунок 28 – Схема стенда для испытаний грунтового объема со «скважиной»:

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 29.

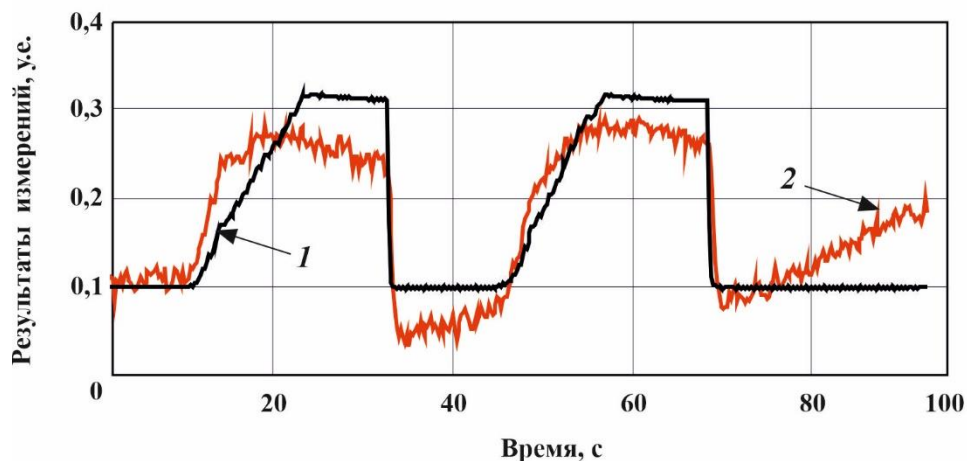


Рисунок 29 – Зависимости выходных сигналов тензометрии $V_\sigma(t)$ (1)

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

В рамках представленной работы изменения напряжений на забое «скважины» также были численно рассчитаны в программном комплексе COMSOL Multiphysics. На Рисунке 30 представлен общий вид расчетной схемы описываемой численной модели.

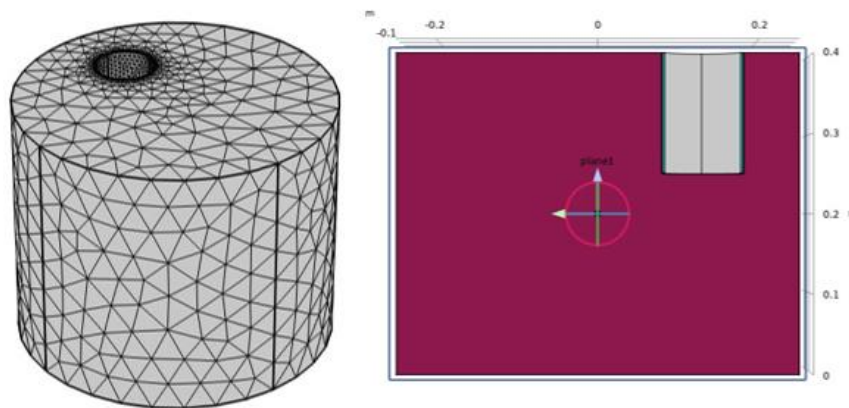


Рисунок 30 – Расчетная схема для численной оценки изменения напряжений на забое «скважины» (граничные условия описаны в тексте)

В численном эксперименте использовалась упругопластическая модель материала с критерием разрушения Кулона–Мора. 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 31 представлен график изменений во времени тангенциальных напряжений на забое "скважины" $\tau(t)$, соответствующих режимам нагрузки, осуществлявшимся в лабораторном эксперименте.

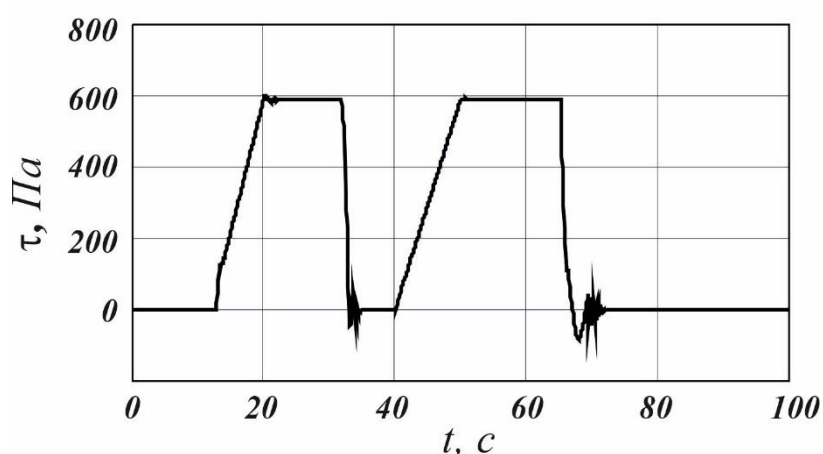


Рисунок 31 – График изменения тангенциальных напряжений на забое скважины $\tau(t)$ во времени

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 терморadiометрии.

Также был сконструирован лабораторный стенд (Рисунок 32) для проведения испытаний при знакопеременном нагружении большого объёма бетона (порядка $0,6 \text{ м}^3$), имитирующего скальную породу. 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.

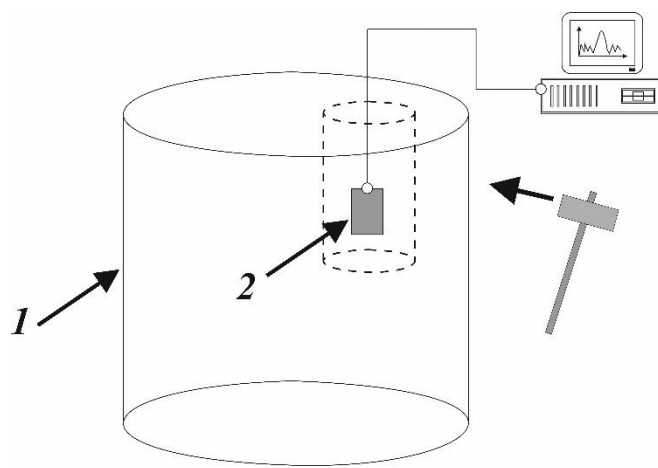


Рисунок 32 – Схема стенда для испытаний «массива» геоматериала (бетона) со «скважиной»

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

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 32).

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 $\approx 1 \text{ см}$ от забоя (Рисунок 32). На Рисунке 33 представлен характерный пример записи выходного сигнала ИК–радиометра $V_w(t)$.

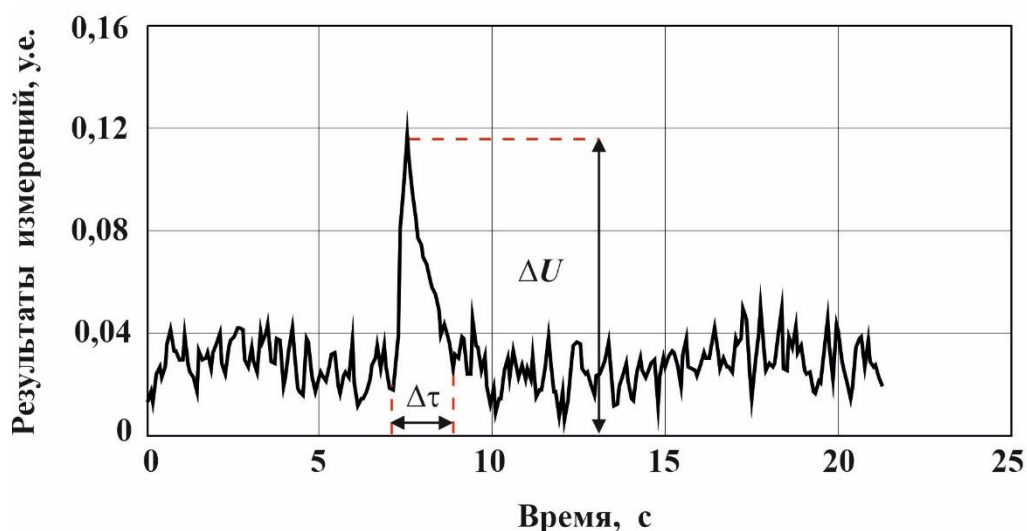


Рисунок 33 – Пример записи выходного сигнала ИК–радиометра $V_w(t)$ при моделировании ударного воздействия на массив скальной породы

На приведенном графике вполне четко фиксируются начало и конец зоны существенной нестационарности сигнала (Рисунок 33). 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 $\Delta\tau \approx 2$ с.

Таким образом, на «больших» объемах геоматериаллов 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.

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

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 терморадиометрических 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 терморadiометрических 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 терморadiометрии.

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".

Основное содержание диссертации опубликовано:

в изданиях, рекомендованных ВАК России

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Балужева 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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. – P. 398-401.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

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

15. 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.

в прочих изданиях и материалах конференций

16. 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. Под ред. В.П. Петрухина и В.И. Шейнина – М.: Изд. «ЭСТ». – 2006. – С. 143 – 148.

17. Шейнин В.И., Блохин Д.И. Диагностика режимов нагружения геоматериалов посредством анализа характерных параметров вариаций во времени интенсивности теплового излучения с их поверхности // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках. Материалы XVIII Международной научной школы им. академика С.А. Христиановича. – Симферополь: Таврич. нац. университет. – 2008. – С. 352 – 354.

18. 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.

19. Шейнин В.И., Блохин Д.И. Вариации интенсивности инфракрасного излучения геоматериалов как информационная основа средств бесконтактного мониторинга механических процессов в геологических структурах // Доклады IX Международной конференции «Новые идеи в науках о Земле». – Москва. – 2009. – Т. 2. – С. 103.

20. Шейнин В.И., Блохин Д.И. Исследования теплового излучения с поверхности геоматериалов на различных стадиях процесса деформирования // Доклады Международной научной конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли». – Новосибирск. – 2010. – С. 111 – 113.

21. Шейнин В.И., Блохин Д.И. Эксперименты по комплексному использованию термомеханических и акустикоэмиссионных эффектов для диагностики деформационных процессов в бетоне и геоматериалах // Исследования и инновационные разработки РААСН. Сборник статей к общ. собр. РААСН. – Иваново: Ивановский архитектурно – строительный университет. – 2010. – С. 264 – 268.

22. 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.

23. Шейнин В.И., Блохин Д.И., Дружинская Д.С., Брысин В.П. Комплексное использование акустикоэмиссионных и терморadiационных измерений для оценки параметров процессов деформирования геоматериалов // Сборник трудов научной конференции, посвященной 100 – летию со дня рождения А.В. Римского – Корсакова. – М.: ГЕОС. – 2010. – С. 154 – 157.

24. 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.

25. 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.

26. Блохин Д.И., Шейнин В.И., Комиссаров А.А., Блохина Т.В. Особенности комплексного использования акустоэмиссионных и терморadiационных измерений для оценки прочностных характеристик геоматериалов / Сборник материалов 53 Международной конференции «Актуальные проблемы прочности». Витебск. – 2011. – Ч. 1. – С. 143 – 145.

27. 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.

28. Шейнин В.И., Блохин Д.И. Разработка методики терморadiационной диагностики опасных природных и техногенных геодинамических процессов в горных выработках / Сборник статей международной научно – технической конференции «Проблемы и пути развития горно-металлургической отрасли». Часть I. – Ташкент.: ТашГТУ. – 2014. – С. 40 – 44.

29. Блохин Д.И., Комиссаров А.А., Максимович И.Б., Шейнин В.И. Экспериментальные исследования проявлений термоупругого и термопластического эффектов при циклическом нагружении образцов каменной соли / Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках. Материалы XXV Международной научной школы им. академика С.А. Христиановича. – Симферополь: Крымский федеральный университет. – 2015. – С. 22 – 27.

30. Блохин Д.И., Новиков Е.А., Комиссаров А.А., Максимович И.Б., Шейнин В.И. Исследования особенностей проявлений термомеханических эффектов в различных геоматериалах при их высокоамплитудном циклическом деформировании / Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках. Материалы XXVI Международной научной школы им. академика С.А. Христиановича. – Симферополь: Крымский федеральный университет. – 2016. – С. 59 – 64.

31. 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.

32. Шейнин В.И., Блохин Д.И. Возможности комплексного использования терморadiационных и акустоэмиссионных эффектов в деформируемых геоматериалах для идентификации опасных геомеханических процессов / Обеспечение качества строительства в г. Москве на основе современных достижений науки и техники. Сборник трудов Первой совместной научно – практической конференции. – М.: ГБУ «ЦЭИИС» и ИПРИМ РАН, 2019. – С. 74 – 80.

33. Блохин Д.И., Шейнин В.И. Исследования особенностей проявлений

термомеханических эффектов в различных геоматериалах при близких к предельным режимам периодического нагружения // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2019. – Т. 6. – № 1. – С. 66 – 70.

34. Блохин Д.И. Инфракрасная диагностика опасных геомеханических процессов в горных выработках, обусловленных природными и техногенными факторами / Тезисы докладов Всероссийской научно – технической конференции с участием иностранных специалистов «Прогноз и предупреждение удароопасности при ведении горных работ». – Апатиты: Изд. – во ФИЦ КНЦ РАН. – 2022. – С. 16 – 17.

35. Шейнин В.И., Блохин Д.И. Обоснование возможности комплексного использования терморadiационных и акустоэмиссионных измерений в системах неразрушающего контроля напряженно – деформированного состояния строительных конструкций и грунтовых массивов / Российский форум изыскателей: сборник докладов V Международной научно-практической конференции. – Москва: Издательский дом КДУ, Добросвет. – 2023. – С. 236 – 240.

36. 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, Москва, 17–20 марта 2026 года. – Москва: НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», 2026. – С. 858 – 863.