



УТВЕРЖДАЮ
И.О. директора ИПКОН РАН

Т.Н. Матвеева

июль 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В.
Мельникова Российской академии наук на диссертационную работу **Высотина
Николая Геннадьевича** на тему: «Обоснование и разработка метода
определения нелинейных параметров упругого гистерезиса горных пород
различных генотипов», представленную на соискание учёной степени кандидата
технических наук по специальности 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных
пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

1. Актуальность темы диссертации

Исследования закономерностей упругого гистерезиса горных пород и количественная оценка параметров гистерезиса имеют фундаментальное и прикладное научное значение в материаловедении и механике твердого тела, в частности, механике горных пород. Фундаментальное значение обусловлено возможностью получения в этих исследованиях феноменологических зависимостей реакции микроструктуры материала на изменение знака деформации. Эта важная информация используется в теоретическом и инструментальном анализе особенностей строения микроструктуры и ее диссипативных свойств, что особенно имеет большое значение для горных пород как материала горно-технических конструкций и фильтрующей среды при разработке твердых полезных ископаемых и углеводородов.

Практика изучения упругого гистерезиса горных пород была связана, главным образом, с изучением деформации горных пород в предположении их пористости или микротрещиноватости. В этом случае нелинейные эффекты описывались соответствующими моделями закрытия дефектов при сжатии породы и раскрытия при снятии сжимающей нагрузки с возможным изменением параметров дефектов и их микроразрушением.

В настоящее время в связи с развитием инструментальных средств исследований и, главное, с развитием компьютерного моделирования при изучении упругого гистерезиса горных пород целесообразно использовать методологию наиболее общего подхода к изучению гистерезисных явлений, без привязки к изначально предполагаемым особенностям микроструктуры, которые могут быть принципиально различными в материалах и породах разной природы. Применение общей, универсальной методологии исследования гистерезисных явлений должно способствовать более полному раскрытию физики этих явлений и использованию соответствующих наработок, полученных в других областях научной и инженерной деятельности. В связи с этим целесообразно использовать обобщенный математический подход теории Прейсаха, которая получила широкое распространение в качестве общего математического инструмента

распространение в качестве общего математического инструмента описания гистерезисных явлений разной природы не только в сплошных средах, но и в системах с памятью. Неравновесное поведение таких систем является интенсивно изучаемой областью в машиностроении, электромагнетизме, структурной биологии, геологии. Поэтому разработки методологии исследования гистерезисных процессов в горных породах является весьма актуальной научной задачей.

Структура и основное содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения, списка литературы, содержащего 128 источников, и 3-х приложений.

Первая глава содержит обзор и анализ результатов научных исследований гистерезисной нелинейности структурно–неоднородных сред, в том числе горных пород, статическими, квазистатическими и динамическими методами. В ней раскрыто понятие упругого гистерезиса и проанализировано влияние дефектности микро– и мезоструктуры на нелинейность упругих свойств образцов горных пород.

Вторая глава посвящена описанию основных пунктов разработанной методики определения нелинейных параметров упругого гистерезиса образцов горных пород различных генотипов. Описаны требования, предъявляемые к подготовке образцов, процесс работы с лабораторной установкой. Приведены примеры снятых нагрузочных диаграмм образцов горных пород различного генезиса и проанализированы полученные результаты.

Третья глава содержит модельную часть исследований упругого гистерезиса горных пород. Предложено использовать двухчленное выражение для описания соотношения напряжение – деформация, описывающее гистерезисную нелинейность поликристаллических сред, содержащее нелинейный статический параметр упругого гистерезиса. Получены величины коэффициентов, входящих в построенные модели, и показано принципиальное их отличие для горных пород различного генезиса. Выполнен расчет величин относительных площадей петель упругого гистерезиса для горных пород различного генотипа и статистически подтверждены тенденции их изменения. На основе модели Прейсаха-Майергойца построены картины плотностей распределения гистеронов в ПМ–пространстве по напряжениям нагрузки и разгрузки, также существенно отличающиеся для горных пород различного генезиса.

Новизна исследований и значимость полученных результатов, выводов и рекомендаций

Установлено, что аналитическое описание кривой разгрузки петли гистерезиса, полученное статистической обработкой экспериментальных результатов механических испытаний образцов горных пород, имеет свойственный каждому генотипу набор коэффициентов полинома. Это позволяет более точно и надежно описывать поведение горных пород при различных нагрузках и деформациях.

Математическое моделирование в пространстве Прейсаха–Майергойца

(ПМ), позволило установить зависимость нелинейных параметров упругого гистерезиса от плотности распределения гистеронов в ПМ-пространстве. Такой подход к изучению упругого поведения горных пород, позволяет более глубоко понять и описать механизм изменения механических свойств под нагрузкой.

Установлено, что относительная площадь петли гистерезиса в координатах «относительная деформация – относительная нагрузка, нормированная к пределу прочности при одноосном сжатии», зависящая от генотипа пород и величины нагрузки и являющаяся мерой потери породой упругой энергии в гистерезисном цикле, пропорциональна величине статического нелинейного гистерезисного параметра.

В диссертации используется общий подход теории Прейсаха и вводится более общее понятие дефекта, отвечающего за гистерезис – гистерон, без привязки к конкретной физике проявления этого дефекта при нагружении и разгрузке породы. Такой методологический подход позволяет использовать новые средства анализа и численные программы исследований.

Практическая значимость результатов работы

Исследования упругого гистерезиса горных пород могут иметь важное прикладное значение для горной геомеханики в связи с моделированием и прогнозом особенностей деформации и разрушения пород вблизи скважин при технологиях закачивания воды в массив и последующих сбросах давления, например, в технологиях скважинной добычи или гидроразрыва, применяемого в горном деле для увеличения метаноотдачи массива или при измерении напряжений в массиве. Гистерезисные особенности деформирования горных пород могут быть учтены при прогнозе изменения проницаемости пород вблизи скважин при добыче нефти, а также в оценках особенностей распространения упругих волн в породах со сложной микроструктурой.

Полученные при проведении исследований методики и результаты могут быть рекомендованы для практического применения организациям, занимающимся проектированием и строительством хранилищ газа, или производством гидроразрыва (Научно-исследовательскому институту горной геомеханики и маркшейдерского дела – Межотраслевому научному центру ВНИМИ, ООО «Газпром геотехнологии», АО «НЦ ВостНИИ» и другим), а также учреждениям науки и образования (профильным институтам РАН и университетам, осуществляющим подготовку горных инженеров).

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным использованием технических средств для механических испытаний и измерений с высокими метрологическими характеристиками, а также апробированных методов и программ компьютерного моделирования и обработки экспериментальных данных; – удовлетворительной сходимостью результатов моделирования на основе предложенных аналитических зависимостей, описывающих упругий гистерезис образцов горных пород, с результатами лабораторных испытаний.

Соответствие работы требованиям, предъявляемым к диссертациям

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что по актуальности, научной новизне и практической ценности диссертационная работа соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление правительства РФ №842 от 24.09.2013 г., ред. от 22.09.2022 г.), она также отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС».

Публикации и апробация результатов работы

Основные положения, результаты и выводы диссертации были доложены на всероссийских и международных конференциях («Неделя Горняка» 2018-2023, «Горнодобывающая промышленность в 21 веке: вызовы и реальность», XXXII сессии Российского акустического общества).

По теме диссертационной работы опубликовано 7 статей, 4 из которых входят в список изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, в том числе 3 – в изданиях, входящих в базу цитирования Scopus.

Замечания по диссертации

По диссертационной работе есть несколько замечаний:

1. В работе гистерон – практически основное понятие, но в полной мере так и не определено. Это что-то в пространстве Прейсаха–Майергойца. Следовало бы дать определение, что такое гистерон.

Приведенные на стр.39 диссертации слова: «Идея, представленная Прейсахом, заключается в применении базовой гистерезисной единицы, называемой гистероном Прейсаха или оператором Прейсаха, в качестве описания одного элемента гистерезиса», также ничего не объясняют.

2. Аналогично выражение, присутствующее в третьем научном положении: «величина статического нелинейного гистерезисного параметра», в работе нет определения что это такое.

3. Стр.12 диссертации. «...такие дефекты, как трещины, могут быть разделены на первичные, связанные с генезисом породы, и вторичные, вызванные многократным воздействием тектонических и гравитационных сил. В поле действующих напряжений данные дефекты являются основным механизмом *неупругой обратимой и необратимой* деформации. Развитие трещин в поле приложенных напряжений определяет *нелинейный упругий деформационный* отклик материала, наблюдаемый экспериментально ...». Здесь какое-то смешение понятий: обратимой может быть только упругая деформация, т.к. по определению: упругая деформация - обратимая деформация, описываемая законом Гука, при которой после окончания действия приложенных сил смещенные межатомные связи возвращаются в свое исходное положение; пластическая деформация - необратимая деформация, при которой после окончания воздействия приложенных сил происходит необратимое смещение межатомных связей. Т.е. обратимой может быть только упругая деформация.

4. Стр.10-11. Высказывание: «Под хрупким характером деформирования нужно понимать способность горных пород испытывать неупругую необратимую деформацию без макроскопического разрушения, не связанную с дислокационными скольжением и двойникованием», звучит странно. Есть ссылка на публикацию Псахье С.Г. и др., но там сказано: «...термином «хрупкий

материал» будут обозначаться материалы, интегральное неупругое поведение которых связано только с локальным разрушением зерен и межзеренных границ и не связано с пластической деформацией их кристаллических решеток», что имеет несколько другой смысл.

5. Актуальность работы не вызывает сомнений, такие фразы в ее обосновании, как «существующие методы определения нелинейных параметров упругого гистерезиса горных пород могут иметь некоторые ограничения и недостатки...», (видимо, могут и не иметь), а также то, что «в настоящее время учет упругого гистерезиса горных пород не находит широкого применения при объяснении результатов механических испытаний...», не обосновывают ее актуальность.

Приведенные замечания имеют рекомендательный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Заключение

Представленная работа по своей актуальности, научной и практической значимости, обоснованности и достоверности основных результатов полностью соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. В ней на основе проведенных автором исследований решена актуальная научная задача разработки методики определения нелинейных параметров упругого гистерезиса горных пород различных генотипов, что имеет важное значение для повышения достоверности параметров численных моделей процессов горного и нефтегазового производства.

Соискатель Высотин Николай Геннадьевич заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.6 «Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика».

Отзыв ведущей организации по диссертационной работе Высотина Николая Геннадьевича заслушан и на совместном научном семинаре профильных отделов ИПКОН РАН, 02.04.2024 года.

Главный научный сотрудник ИПКОН РАН,
д-р техн. наук

 В.А. Трофимов
 О.Н. Малинникова

Главный научный сотрудник ИПКОН РАН,
д-р техн. наук

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук

Адрес: 111020, Москва, Крюковский тупик, д.4.

Подписи Виталия Александровича Трофимова и Ольги Николаевны Малинниковой удостоверяю

Ученый секретарь ИПКОН РАН,
д-р техн. наук, профессор



 С.С. Кубрин