

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук Максимова Германа Адольфовича на диссертацию **Манакова Сергея Александровича «Экспериментальные исследования структурно-неоднородных сред методами когерентной акустики»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.06 – **акустика**

Диссертационная работа Манакова С.А. посвящена экспериментальному исследованию структурно-неоднородных сред. Актуальность диссертационной работы не вызывает сомнений, так как в структурно неоднородные среды представляют собой широкий класс материалов природного и искусственного происхождения. Они характеризуются наличием сложной внутренней структурой и наличием широкого спектра пространственных масштабов, что проявляется в их акустических свойствах.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

Во введении представлен обзор состояния проблемы, решению которой посвящена данная работа. Проведен анализ литературы посвященной акустике пористых сред, насыщенных жидкостью, исследованию акустической нелинейности структурно-неоднородных сред, а также методам экспериментальных исследований. Отмечены имеющиеся недостатки и необходимость проведения дополнительных исследований, развития соответствующих методов измерений, которые в дальнейшем используются в представленной работе. Также отмечается необходимость совместного анализа информации, полученной в лабораторных и натуральных условиях, для развития дистанционных сейсмоакустических методов. Во введении сформулированы цели и конкретные задачи исследования, научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены результаты экспериментального исследования образца горной породы методами акустической спектроскопии. Отмечаются недостатки известных из литературы исследований, а также необходимость совместного анализа объемных и сдвиговых деформаций в контролируемых условиях проведения измерений. Метод резонансной акустической спектроскопии позволяет выполнить такие исследования. В **параграфе 1.1** описан метод измерений и условия их проведения. Отмечается стабильность внешних (термодинамических) условий, в которых образец находился в процессе измерений. Измерения проводились методом резонансной акустической спектроскопии и ее адаптации для ко-

нечных амплитуд, когда резонансный отклик становится отличным от линейного. В **параграфе 1.2** приведено описание свойств исследуемого образца. В **параграфе 1.3** представлены и обсуждаются результаты измерений линейных модулей упругости и коэффициентов потерь материала образца в зависимости от степени насыщения водой и частоты. Обращено внимание на то, что при изменении степени насыщения удастся проследить три этапа изменения акустических свойств. На первом этапе при очень малом насыщении в эксперименте наблюдалось небольшое уменьшение модулей объемной и сдвиговой жесткости. Затем при насыщении порядка 1% было измерено увеличение модулей упругости приблизительно на 10%. На третьем этапе, который связан с постепенным заполнением пор жидкостью, модули упругости плавно уменьшались. Коэффициент потерь резко возрос примерно вдвое на первом этапе, затем, на втором этапе, наблюдались малые изменения величины коэффициента потерь, и, наконец, на третьем этапе его величина монотонно возрастала. Общее увеличение поглощения составило приблизительно 10 раз. Представлены оценки, позволяющие получить согласие с результатами измерений.

В **параграфе 1.4** представлены результаты исследования нелинейного резонансного отклика образца на модах колебаний, отвечающих продольным и крутильным колебаниям, при трех степенях насыщения, которым отвечали обнаруженные ранее качественные изменения линейных акустических характеристик. Проведены исследования в широком диапазоне изменения амплитуды деформаций от 10^{-9} до нескольких единиц 10^{-6} . Утверждается, что для продольной моды наблюдался скачкообразный переход от классической нелинейности с характерной квадратичной зависимостью резонансной частоты от амплитуды к нелинейности предположительно гистерезисного типа, для которой резонансная частота линейно зависит от амплитуды деформаций. Утверждается, что амплитуда деформации, при которой наблюдалось изменение режима деформирования, зависела от степени насыщения пор жидкостью. С увеличением насыщения пороговое значение амплитуды деформаций уменьшалось. При этом измеренные пороговые амплитуды деформации имеют тот же порядок, что и обнаруженные ранее в литературных источниках. Утверждается, что скачкообразное изменение в указанных литературных источниках не наблюдалось, данные носят фрагментарный характер, а условия измерений не контролировались. Представленные результаты, во-первых, лишены указанных недостатков, и, во-вторых, был проведен совместный анализ объем-

ных и сдвиговых деформаций, включающий анализ амплитудной зависимости коэффициента поглощения. Все это позволило обнаружить качественное отличие объемных деформаций. Амплитуде деформаций, при которой скачком происходит изменение режима деформирования, отвечает также максимум поглощения. Это позволило связать наличие скачкообразного изменения режима деформирования с диссипативными процессами. Предложено качественное объяснение наблюдавшихся в эксперименте эффектов.

В параграфе 1.5 представлены результаты экспериментального исследования медленной релаксации после длительного вибрационного воздействия. Отличительной особенностью и элементом новизны является измерения отклика на разных видах деформаций, что позволило предположить связь медленной динамики с особенностями взаимодействия зерен (структурных элементов). Наблюдаемые эффекты медленной релаксации автором связываются с наличием метастабильных состояний в потенциале взаимодействия контактирующих зерен, составляющих образец. **В параграфе 1.6** представлены выводы для первой главы.

Во второй главе диссертации описан метод и созданная на его основе экспериментальная установка для измерения акустических свойств сыпучих материалов. Созданная экспериментальная установка позволяет измерить отклик дисперсных сред, как на динамический сдвиг, так и на динамическое изменение объема. Новизна подхода заключается в том, что предложенная схема позволяет проводить измерения в широком диапазоне амплитуд деформаций и в области частот, характерных для натуральных сейсмоакустических измерений. **В параграфе 2.1** приведено исчерпывающее теоретическое обоснование нового метода и описание экспериментальной установки. Основа нового метода – физический маятник, элементом жесткости которого является контейнер с гранулированной средой. Сравнение резонансных частот пустого и заполненного контейнера позволяет определить эффективные модули упругости исследуемого материала. Новый метод был апробирован на двух модельных средах: случайной упаковки стеклянных шаров и зерен корунда. Описание двух модельных гранулированных сред изложено в **параграфе 2.2**. **В параграфе 2.3** представлены измеренные зависимости модулей упругости гранулированных сред от внешнего статического давления. В случае плотной случайной упаковки гладких стеклянных шаров зависимость имеет степенную зависимость с показателем $1/3$, что соответствует теории Герца–Миндлина.

Для упаковки зерен электрокорунда модули упругости увеличиваются линейно с ростом давления, что объясняется особенностью контакта шероховатых поверхностей двух зерен. В **параграфе 2.4** представлены результаты исследования нелинейных эффектов в случайной упаковке стеклянных шаров. Были проведены измерения зависимости резонансных частот от амплитуды деформации. В области умеренных деформаций наблюдаются линейные зависимости частот от амплитуды, что связывается с гистерезисом в контакте шаров. Утверждается, что с увеличением уровня деформаций проявляется зависимость вида « $1/\epsilon$ », что связывается с динамическим «разжижением». Также были измерены зависимости модулей упругости от времени после длительного вибрационного воздействия. Релаксации модулей упругости к конечному состоянию в упаковке стеклянных шариков идет по логарифмическому закону. При этом наклон зависимости зависимостей одинаков, как для модуля объемной жесткости, так и модуля сдвига, что указывает на источник процесса медленной релаксации в области контакта зерен. В **параграфе 2.5** представлены выводы для второй главы.

В **третьей главе** представлены результаты сейсмоакустических измерений скоростей упругих волн в дисперсном грунте в натуральных условиях. В **параграфе 3.1** описывается опыт применения межскважинного профилирования на SH-волнах с использованием когерентного излучателя. Также приведено описание источника SH-волн. Использование когерентного излучателя позволило провести фазовые измерения, тем самым, повысив точность измерения скорости волны сдвига. Высокая точность измерений позволила разрешить слоистую структуру со слабым контрастом геоакустических параметров. В **параграфе 3.2** описан метод, основанный на анализе кинематических и амплитудных характеристик волны Рэлея. Отличительной особенностью метода является включение в решение обратной задачи, наряду с дисперсией (на чем основаны методы SASW/MASW), частотной зависимости отношения проекций вектора смещения свободной поверхности. Особенностью методов, описанных в параграфах 3.1 и 3.2, является обработка первичных данных, в которой учитывается фаза принимаемого сигнала. В **параграфе 3.2** также представлены результаты натуральных измерений скоростей упругих волн в приповерхностном слое при искусственном насыщении его водой. Проведено качественное сравнение с результатами, полученными в первой главе (из-

менение модулей упругости в зависимости степени насыщения). В **параграфе 3.3** представлены выводы для третьей главы.

Результаты диссертации сформулированы в **заключение** диссертации, они имеют научную и практическую значимость. Полученные результаты, несомненно, будут востребованы, как при дальнейших исследованиях взаимодействия акустических волн в структурно-неоднородных средах, так и при разработке лабораторных и дистанционных сейсмоакустических методов.

При общей положительной оценке диссертационной работы имеются ряд замечаний.

1. В первой главе для получения экспериментальных результатов автор использует известный метод резонансной акустической спектроскопии, в котором оценка параметров среды определяются путем их подгонки под экспериментально измеренный резонансный отклик образца на разных частотах в рамках модели упругой среды с поглощением. Поэтому исходные экспериментальные данные и качество их воспроизведения моделью должны являться первичными результатами первой главы, которые могут в дальнейшем как-то интерпретироваться. К сожалению, в первой главе приведен лишь один рисунок 1.4, на котором представлены единственные исходные экспериментальные данные (для полностью насыщенного образца) и совершенно отсутствует демонстрация качества их воспроизведения моделью.
2. В главе 1 обсуждаются свойства пористой проницаемой среды при различных уровнях насыщения, хотя восстановление по экспериментальным данным производится в рамках модели однородной среды с поглощением. При таком подходе полностью игнорируется, например, специфическое затухание, связанное с движением жидкости относительно скелета в близи открытой поверхности образца. Более логичным было бы использовать модель пористой проницаемой среды для восстановления ее параметров. Отсутствие информации об исходных экспериментальных данных и качества их воспроизведения моделью с найденными параметрами не позволяет оценить роль указанного эффекта.
3. В разделе 1.3 на рис.1.7 приводятся зависимости модулей упругости и коэффициентов потерь от степени насыщения водой. Автор выделяет три участка с разным характером изменения этих свойств. Од-

нако в наиболее интересной области насыщения от 0.1% до 3%, где дважды меняется характер зависимости, имеется всего две экспериментальные точки, которых явно недостаточно для уверенного определения характера поведения модулей упругости и коэффициентов потерь в этой области.

4. Это тем более важно, поскольку «Полученный характер изменения модулей упругости в зависимости от степени насыщения качественно отличается от результатов [19], которые воспроизводятся во многих работах» (стр. 34). Обращает на себя также внимание не только качественное, но принципиальное количественное расхождение результатов диссертации и работы [19]. «Такое сравнение оправдано, поскольку средний размер зерен и пористость материалов, рассмотренных нами и в работе [19], близки» (стр. 34). «В работе [19] наблюдается почти трехкратное увеличение модулей упругости при уменьшении степени насыщения ниже 2% (рис. 1.10). Нашим данным отвечают 10-ти процентные измерения модулей упругости во всем диапазоне изменения насыщения» (стр. 34). С учетом замечаний 1 и 2 такое расхождение может иметь методические корни.
5. В связи с замечанием п.4 модельные оценки на стр. 35 – 43, служащие для объяснения полученных в разделе 1.3 результатов, не придают им большей обоснованности. Они не объясняют явное количественное расхождение с результатами работы [19].
6. В разделе 1.4 при исследовании нелинейного резонансного отклика карбонатной горной породы явно не хватает сравнения с экспериментальным поведением образца эталонной среды с аналогичными упругими и известными нелинейными свойствами. Это могло бы сразу снять возникающие вопросы о характере выявленной нелинейности.
7. Характер степенных зависимостей, приведенных на рис. 1.11, удобнее иллюстрировать при логарифмическом масштабе по обеим осям.
8. В диссертации систематически не приводятся исходные экспериментальные данные. Чего стоит, например, фраза из раздела 1.4 (стр.48): «Дополнительным аргументом в пользу отсутствия артефактов в данных, представленных на рис. 1.12, является сравнение амплитудных зависимостей резонансной частоты продольной моды для воздушно-сухого и сухого образцов (графики не приводятся)». Как можно использовать в качестве аргумента то, что не предъявлено?

9. Не вполне понятна научная ценность результатов раздела 1.5 при исследовании медленной релаксации остаточных деформаций, поскольку на стр. 59 утверждается, что «Представленные на рис. 1.15 данные указывают на то, что полученные в данной работе величины d для исследуемого образца в целом ничем не выделяются по сравнению с величинами d , отвечающими экспериментальным данным других исследователей». Просто еще раз произведены измерения?
10. В первой главе представлены результаты исследования одного образца карбонатной горной породы. С одной стороны, при наличии подробных данных о свойствах образца, проведенное комплексное исследование позволяет сузить круг возможных физических интерпретаций, а с другой стороны, для того, чтобы сделать выводы об адекватности предложенных механизмов желательно набрать статистику, проведя измерения для нескольких образцов различных материалов.
11. В главе 2 результаты, полученные для модельной неконсолидированной среды в виде стеклянных шариков, отличаются от предсказываемых теорией: «Ожидаемые величины в среднем в 4.2 раза больше отвечающих эксперименту», как отмечено на стр. 85. В этой связи есть вопрос либо к выбору и качеству подготовки модельной среды, либо к не учёту существенных факторов, влияющих на полученный результат, например, в виде влияния силы тяжести на поведение неконсолидированной среды при малых давлениях. Модельная среда для того и используется, чтобы можно было опираться на теорию. Несколько странным выглядит необходимость списывать расхождение с теорией на неровности поверхности стеклянных шариков. В этой связи с методической точки зрения также странным выглядит порядок представления результатов, сначала для более сложной для описания среды из зерен корунда, а потом для модельной среды из стеклянных шариков, для которых теория опять не работает.
12. В разделе 2.4 при исследовании нелинейных эффектов и релаксации в гранулированной среде явно не хватает результатов сравнения с наполнителем в виде упругой среды или даже жидкости с известными упругими и нелинейными свойствами.

13. Обращает на себя фраза на стр. 88 «Для удобства сравнения с известными результатами пересчет в модули упругости не производился...». Для удобства обычно что-то делают.
14. В главе 3, посвященной исследованию грунтов в натуральных условиях методами когерентной сейсмоакустики, полностью отсутствуют примеры исходных экспериментальных данных. Приведенное описание методики их обработки и их сравнение с результатами модельных расчетов представлены в столь кратком и компактном виде, который не позволяет убедиться в их достоверности.
15. Раздел 3.2 «Развитие фазовых методов измерения характеристик природных сред в натуральных условиях с использованием поверхностных волн» не содержит описания проверяемых экспериментальных результатов. Имеются лишь отсылки типа (стр. 111): «Подробные эксперименты описаны в публикациях [128-131]» (орфография сохранена). Описание методики обработки данных ограничено одним абзацем из четырех предложений (стр. 111). Решение обратной задачи по определению неоднородных свойств грунта описано в одном абзаце из трех предложений (стр. 111). При такой детальности описания трудно понять, в чем состоит развитие фазовых методов измерения, а также полностью теряется осмысленность обсуждения полученных результатов.
16. Основные результаты диссертации сформулированы с одной стороны не вполне конкретно, и из них сложно понять, о чем идет речь, а с другой стороны излишне категорично, что не соответствует фактическому материалу.
17. В качестве результата представлено следующее: *«Обнаруженная частотная дисперсия фактора потерь при насыщенности, близкой к полной, дает объяснение имеющихся в литературе расхождений в моделях затухания звука в донных осадочных породах»*. Исчерпывающего объяснения, на самом деле, не представлено, здесь скорее подойдет фраза *«позволяет предложить объяснение»*.
18. В качестве результата представлено следующее: *«Экспериментально доказано, что эффекты медленной релаксации связаны с процессами в области контакта структурных элементов гетерогенной среды, а соответствующие пространственные масштабы имеют порядок радиуса действия сил Ван-дер-Ваальса для консолидированных сред и порядок пространственного размера вакансий между зерна-*

ми в случае сыпучих сред». Однако прямого экспериментального доказательства в диссертации нет. Более адекватным была бы фраза «Оценки показывают, что эффекты медленной релаксации могут быть связаны с процессами ...»

19. Положения, выносимые на защиту, также содержат неточности формулировок, например,

- в Положении 1: К затуханию звука в морском дне результаты первой главы имеют лишь косвенное отношение и поэтому не могут претендовать на физическое объяснение имеющихся в литературе разногласий по поводу механизмов такого затухания.

- в Положении 3: В главе 3 явно не раскрыто в чем именно состоит новизна методов когерентной сейсмоакустики, которая «... позволяет проводить диагностику структуры земных структур...».

Несмотря на приведенные выше замечания, связанные, по всей видимости, с недостатками изложения материала, диссертационная работа С.А. Манакова является завершенной научно-квалификационной работой, в которой представлены актуальные и полезные результаты, связанные с определением упругих, диссипативных и нелинейных свойств консолидированных и неконсолидированных сред, имеющих важное прикладное значение. Работа носит экспериментальный характер, в ней представлен анализ большого объема экспериментальных данных, полученных различными методами. Для них представлена как качественная, так и количественная физическая интерпретация, и оценка. Основные результаты диссертации изложены в 25 работах, из которых 8 опубликованы в реферируемых изданиях. По диссертации были подготовлены доклады на российских и международных конференциях. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

Диссертация Манакова С.А., как научно-квалификационная работа, соответствует требованиям положения о присуждении ученой степени ВАК, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.06 – акустика.

Официальный оппонент

Максимов Герман Адольфович,

доктор физико-математических наук,

Акционерное общество «Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева»,

начальник отдела Геоакустики

107036, Россия, г. Москва, ул. Шверника, д. 4,

8(903)1862309,

gamaximov@mail.ru

Подпись Максимова Г.А. заверяю

Заместитель научного руководителя

по научной работе и ВЭД



В.А. Пирогов