

«Утверждаю»

Проректор
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова» (МГУ)



Федянин Андрей Анатольевич

« 09 » февраля 2017г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу 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 исследованию линейных и нелинейных акустических свойств структурно-неоднородных твердых сред в лабораторных и натуральных условиях в целях развития методов дистанционных исследований, и в более широком смысле, углублению понимания физических свойств гранулированных сред. Эта область исследований продолжает привлекать внимание исследователей и не теряет актуальности уже многие десятилетия. Наличие дефектов и неоднородностей в таких материалах приводит к появлению новых физических свойств, которые отсутствуют в однородных твердых телах. Мезомасштабные неоднородности и дефекты существенно влияют и на упругие свойства структурно-неоднородных материалов. Наряду с упругой нелинейностью, обусловленной ангармонизмом кристаллической решетки (классическая нелинейность), в этих материалах проявляется структурная (неклассическая) нелинейность, обусловленная дефектами среды. В многочисленных экспериментах, проведенных как отечественными, так и зарубежными исследователями, было показано, что структурная нелинейность может на несколько порядков превышать величину классической нелинейности, и имеет пороговый характер. Особенности взаимодействий акустических волн на мезоскопических масштабах явным образом проявляются в макроскопическом акустическом отклике. Это позволяет судить о мезоскопической структуре гранулированной среды по ее макроскопическому отклику.

Адекватное понимание физических особенностей таких сред имеет важное прикладное значение. В частности, очевидна необходимость таких исследований в связи с проблемами геофизики, поскольку многие горные породы имеют характер неконсолидированных или частично консолидированных гранулированных сред, а также в связи множеством технологических применений, так как во многих процессах на той или иной стадии очень часто используются гранулированные материалы. Изучение упругих и акустических свойств неконсолидированных гранулированных сред, подвергаемых внешним воздействиям, является основой для обеспечения контроля над эволюцией их

внутренней структуры и, несомненно, представляет научный и практический интерес, в том числе, для задач сейсморазведки.

Несмотря на то, что в последнее время уже имеется большое количество работ по исследованию акустических свойств гранулированных сред, в этой области еще имеется ряд нерешенных задач. Поэтому тема диссертационной работы Манакова С. А. актуальна, является фундаментальной, и имеет прикладное значение.

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав и заключения. Общий объем работы – 136 страниц, включая 30 рисунков и список литературы из 133 наименований.

Во введении проведен анализ современного состояния рассматриваемых в диссертации проблем, сформулированы задачи диссертационной работы и положения, выносимые на защиту, обосновываются научная новизна, актуальность темы работы и ее практическая значимость, кратко излагается ее содержание,

В первой главе приведены результаты исследований упругих свойств пористой горной породы при разных степенях насыщения водой. Насыщение водой оказывает существенное влияние на диссипативные и упругие свойства пористых материалов. Для экспериментальных исследований в работе выбран метод резонансной акустической спектроскопии, который позволяет с высокой точностью исследовать линейные, нелинейные упругие, а также диссипативные свойства гранулированных сред.

В параграфе §1.1 приведено описание оригинальной автоматизированной экспериментальной установки и методики для исследования линейных и нелинейных упругих свойств консолидированных гранулированных сред методом резонансной спектроскопии. Новым является то, что предлагаемые установка и методика позволяют одновременно исследовать объемные и сдвиговые упругие свойства пористого образца горной породы в зависимости от насыщенности его водой.

В §1.2 приведено описание образца: его форма, размеры, плотность, химический, минералогический и гранулометрический состав. Образец представляет собой светло-серый сильнопористый известковый доломит, плотность которого составила $\rho=2,81 \text{ г/см}^3$, пористость- $\phi=18,3\%$. Размеры пор варьируются в широких пределах (10^{-5} – 10^{-1}) мм. В области низких частот, используемых в работе при измерениях, автор считает образец однородным изотропным твердым телом. Экспериментальные исследования показали, что влияние макроскопических неоднородностей на упругие свойства образца проявляется на частотах выше 40 кГц. К сожалению, в диссертации не приводятся величины скоростей продольных и сдвиговых волн в исследованных образцах.

В §1.3 представлены результаты экспериментальных исследований зависимости модулей упругости C_{11} , C_{44} и коэффициентов потерь η_{11} , η_{44} в образце карбонатной горной породы от степени насыщения пор водой S в интервале (0-100) %. Было обнаружено, что модули упругости C_{11} , C_{44} немонотонно зависят от степени насыщения S пор водой. На начальном участке при $S<0,1\%$ модули упругости C_{11} , C_{44} уменьшаются, а потери резко возрастают. В интервале насыщения $0,1\%<S<1\%$ жесткость образца увеличивается и при $S=1\%$ наблюдается максимум. Дальнейшее увеличение количества жидкости в образце приводит к плавному уменьшению модулей упругости и плавному росту потерь.

Этап 1 автор связывает с конденсацией влаги на стенках пор и образование мономолекулярного слоя жидкости. Это приводит к уменьшению силы когезии. На втором этапе происходит формирование менисков в местах контакта зёрен и возникновение капиллярных сил поджатия зёрен. И, наконец, этап 3 определяется, как этап постепенного заполнения всего пространства пор жидкостью, что приводит к уменьшению вклада капиллярных сил.

Высокая точность измерений позволила выделить стадии насыщения образца жидкостью: конденсацию, образование менисков и монотонное заполнение пор жидкостью, которым отвечают качественные изменения акустических характеристик.

Обсуждаются физические механизмы, объясняющие влияние степени насыщения образца жидкостью на его упругие характеристики и проводится сравнение экспериментальных результатов, полученных в работе с аналогичными результатами, полученными другими авторами.

Проведенные в интервале частот (10-40) кГц измерения упругих коэффициентов и поглощения в сухом образце дисперсии этих величин не обнаружили. Однако при полном насыщении образца водой обнаружена дисперсия коэффициента η_{44} с частотной зависимостью $\sim \omega^{0,36 \pm 0,2}$.

Принципиальным отличием от известных в литературе зависимостей упругих автор считает наличие минимума величин C_{11} и C_{44} при малом содержании жидкости в образце и наличия максимума этих величин при увеличении насыщения образца жидкостью.

Полученные результаты позволили объяснить имеющиеся в литературе расхождения в моделях затухания звука в донных осадочных породах.

Проведенные через две недели контрольные измерения модулей упругости в воздушно-сухом образце не обнаружили деградации образца после его насыщения водой, нагревания и высушивания

В §1.4 приведены результаты исследования нелинейного резонансного отклика образца карбонатной горной породы на двух модах колебаний: первая продольная и вторая крутильная и при трех степенях насыщения жидкостью порового пространства. Исследования проведены на двух модах колебаний (первая продольная и вторая крутильная) образца для трех степеней насыщения жидкостью порового пространства в нем. При увеличении амплитуды деформаций в образце наблюдалось изменение формы резонансных кривых, характерное для колебаний нелинейного осциллятора. При амплитуде продольных деформаций $\epsilon < 10^{-7}$ наблюдается квадратичная зависимость относительного изменения собственной частоты резонатора от амплитуды деформаций в нем. При амплитудах деформаций $\epsilon > 10^{-7}$ обнаружено качественное изменение режима колебаний: появляются два локальных максимума.

Появление второго максимума автор обоснованно связывает с резким увеличением упругой нелинейности при деформациях $\epsilon > 10^{-7}$: в образце, кроме классической нелинейности, проявляется неклассическая нелинейность, имеющая пороговый характер. (Утверждение диссертанта, что при деформациях в образце $\epsilon \approx 10^{-7}$ обнаружен неизвестный ранее эффект скачкообразного перехода от классической нелинейности к нелинейности гистерезисного типа при увеличении амплитуды колебаний в образце для деформаций с изменением объема не совсем корректен: классическая нелинейность, связанная с ангармонизмом межатомного взаимодействия, в твердых телах присутствует всегда. Авторы наблюдали «включение» неклассической (структурной) нелинейности при $\epsilon \approx 10^{-7}$, которая является пороговой и значительно больше классической нелинейности.)

При этом зависимость резонансной частоты образца от амплитуды колебаний становится линейной, что характерно для неклассической нелинейности. С увеличением содержания воды в поровом пространстве образца проявление неклассической нелинейности наблюдается при меньших амплитудах деформаций. Наличие жидкости приводит к уменьшению коэффициента адгезии, и, соответственно, прочности связей между зернами и, как следствие, к уменьшению порога деформации, при котором появляется неклассическая нелинейность. Увеличение резонансной частоты продольных колебаний при переходе к режиму с предполагаемым отрывом контактов в работе качественно объясняется тем, что динамический коэффициент адгезии существенно превышает коэффициент адгезии при плавном разъединении поверхностей. Скачкообразное изменение модуля объемной жесткости сопровождается максимумом поглощения, что связывается с диссипативными процессами при отрыве контакта с адгезией. Уровень деформации, отвечающий качественному изменению режима колебаний,

зависит от степени насыщения пор жидкостью и уменьшается по мере увеличения насыщенности. Измеренные зависимости коэффициента поглощения от амплитуды имеют аномалии в области тех же амплитуд деформации, что и аномалии для резонансных частот. При этом наличие немонотонной зависимости согласуется с высказанным предположением о роли диссипативных процессов при переходе от режима деформаций с классической нелинейностью к режиму деформаций с неклассической нелинейностью.

Результаты экспериментальных исследований медленной релаксации остаточных деформаций представлены в §1.5. В работе рассмотрены следующие варианты: (1) релаксация резонансных частот продольной и крутильной мод после длительного воздействия на резонансе продольной моды, и (2) релаксация тех же резонансных частот после длительного воздействия на резонансе крутильной моды. Измерения зависимости собственных частот резонатора от времени после динамического воздействия проводились с использованием минимально возможных амплитуд деформаций ($\sim 10^{-9}$). Проведенный анализ экспериментальных результатов позволяет сделать предположение, что эффект медленной динамики в значительной мере связан с наличием метастабильных состояний дефектной структуры, в которые она переходит в результате приложения к образцу сильного силового воздействия (динамического или статического). После снятия силового воздействия происходит медленная релаксация дефектной структуры в образцах к ее равновесному состоянию.

В §1.6 приводится заключение к первой главе.

Вторая глава посвящена описанию нового метода, предложенного в диссертации, для изучения упругих свойств неконсолидированных гранулированных сред, и результаты исследований с его помощью модельных сыпучих материалов в лабораторных условиях. В начале главы проводится краткий литературный обзор, посвященный исследованию гранулированных неконсолидированных сред, отмечается актуальность таких исследований. Приводится краткое содержание главы.

В §2.1 приведено описание нового метода измерения неконсолидированных гранулированных материалов и разработанной на его основе экспериментальной установки. Для уменьшения неоднородности деформаций была использована схема математического маятника, где элементом упругости является исследуемый материал с контейнером, а элемент инерции выполнен из металла. Метод основан на измерении резонансных свойств контейнера с исследуемым сыпучим материалом. Помимо поля тяжести Земли в установке предусмотрено приложение к гранулированной среде регулируемого внешнего давления. Упругие свойства неконсолидированных материалов определялись на основе анализа резонансного отклика контейнера, содержащего исследуемое вещество. Важно отметить, что созданная экспериментальная установка позволяет исследовать отклик дисперсных сред, как на динамический сдвиг, так и на динамическое изменение объема в широком интервале деформаций $\epsilon \sim (10^{-9} \div 10^{-4})$. Сами измерения являются разностными, т.е. упругие параметры сыпучей среды определяются разностью резонансных частот и добротностей колебаний заполненного и пустого контейнера. Описана методика калибровки экспериментальной установки, которая показала работоспособность предложенного метода и высокую точность проводимых с его помощью измерений. Параметры экспериментальной установки были подобраны так, что резонансные частоты контейнера (100, 200) Гц близки к частотам природных сейсмоакустических измерений, что позволяет использовать полученные результаты для интерпретации природных измерений. К сожалению, в работе не приводятся

экспериментально измеренные резонансные кривые для продольных и крутильных колебаний пустого контейнера и с исследуемым материалом. Также не обсуждается влияние адгезии между стенками контейнера и исследуемым материалом на результаты измерения упругих параметров диагностируемой среды.

В §2.2 приведено описание образцов модельных неконсолидированных гранулированных сред. Среды моделировались упаковкой стеклянных микрошаров размером (200 – 450) мкм и частицами электрокорунда марки 24А-85Ф, среднее значение размеров которых равно (200 ± 40) мкм. Эти материалы моделировали природные среды с гладкими и шероховатыми частицами.

В §2.3 приведены результаты экспериментальных исследований влияния внешнего давления, приложенного к диагностируемой неконсолидируемой гранулированной среде, на величину модулей всестороннего сжатия K и модуля сдвига G в ней. Было установлено, что в случае случайной упаковки стеклянных шаров, величины модуля всестороннего сжатия K и модуля сдвига G пропорциональны величине давления в степени 1.3. Такая зависимость хорошо согласуется с теорией Герца–Миндлина. Для упаковки зерен электрокорунда модули упругости K и G увеличиваются линейно с ростом давления. На основе проведенного анализа линейную зависимость модулей упругости диссертант объясняет особенностью свойств контакта двух шероховатых поверхностей зерен корунда.

В §2.4 представлены результаты наблюдения нелинейных эффектов и релаксации упругих свойств в гранулированной неконсолидированной гранулированной среде. Нелинейные свойства гранулированных сред были измерены на основе эффекта быстрой динамики: исследовалась зависимость частот продольного и крутильного резонансов контейнера с исследуемым материалом от амплитуды деформаций. В области умеренных конечных динамических деформаций наблюдаются линейные зависимости частот от амплитуды, что характерно для уравнений состояния напряжение–деформация с нелинейным гистерезисом. Дальнейшее увеличение уровня деформаций приводит к появлению зависимостей вида « $1/\epsilon$ ». Переход к режиму « $1/\epsilon$ » зависимости резонансных частот от амплитуды деформации соискатель связывает с динамическим «разжижением» неконсолидированной среды, когда по мере увеличения амплитуды деформации все меньшая часть гранул остается связанной с колебаниями контейнера. Были оценены пороговые амплитуды деформаций, отвечающие изменению режима колебаний гранулированной среды и началу предполагаемого разрушения структуры связей в среде. Для продольных колебаний эта величина оценивается как $\epsilon_P \sim 0,003\epsilon_0$, а для крутильных колебаний $\epsilon_S \sim 0,003\epsilon_0$, где $\epsilon_0 = 6,5 \cdot 10^{-5}$ – статическая деформация зерен.

В упаковке стеклянных шаров при двух значениях статического давления после интенсивного вибрационного воздействия на упаковку при амплитуде деформаций $\epsilon \sim 10^{-6}$ в течение 30 минут был исследован эффект медленной динамики. Вибрационное воздействие приводило упаковку шариков в возмущенное состояние. После выключения вибрационного воздействия наблюдалась медленная релаксация модулей объемной жесткости и сдвига к исходному состоянию. Измерения проводились с минимальными амплитудами деформации $\sim 10^{-7} - 10^{-8}$. Было обнаружено, что модули объемной жесткости и сдвига при релаксации увеличиваются пропорционально логарифму времени в некотором диапазоне изменения времени. При увеличении статического сжатия упаковки происходит сокращение интервала времен, при которых наблюдается логарифмическая зависимость от времени. При этом наклон зависимостей для обоих модулей упругости одинаков, что указывает на один источник процесса медленной релаксации в области

контакта гранул. Уменьшение жесткости при вибрационном воздействии объясняется разрушением внутренней структуры связей между зернами.

В §2.5 приводится заключение ко второй главе.

В третьей главе приведены результаты натуральных дистанционных исследований упругих свойств приповерхностных слоев грунта. Отмечается практическая значимость этих исследований при проектировании и строительстве фундаментов, разведке полезных ископаемых, оценке риска захоронения опасных отходов. Для дистанционной диагностики состояния грунта в натуральных условиях в диссертации рассматривается два метода. Первый основан на межскважинном профилировании с использованием SH-волн: сдвиговых волн с горизонтальной поляризацией, во втором используются волны Рэлея. Этот метод разрабатывался совместно с А.И. Коньковым. Достоинством предложенных методов является то, что оба метода являются неразрушающими. Использование фазовых методов в сейсмоакустике позволили проводить диагностику земных структур при слабой изменчивости геофизических параметров приповерхностных слоев на уровне до единиц процентов.

В §3.1 рассмотрены результаты межскважинного профилирования приповерхностного слоя на SH-волнах с использованием когерентного скважинного излучателя разработанного в Институте прикладной физики РАН. Проанализированы преимущества использования объемных сдвиговых волн с горизонтальной поляризацией (SH-волн) для профилирования упругих свойств слоистых приповерхностных сред. Высокая когерентность зондирующего излучения позволила провести длительное накопление сигнала, повысить отношение сигнал-шум, и синтезировать антенну, используя один векторный геофон. Стабильность излучаемого сигнала дала возможность осуществлять фазовые измерения, что позволило измерять скорость сдвиговых волн с высокой точностью и разрешить слабоконтрастные слои. В условиях полигона «Безводное» было проведено вертикальное профилирование скорости SH-волны в приповерхностной слоистой среде и разрешен слабый упругий контраст слоев, состоящих из суглинка, супеси и глины. Расположение границ слоев, полученных акустическими методом и по результатам бурения на расстоянии 500 метров от места проведения эксперимента, находятся в хорошем согласии.

В параграфе §3.2 приведены результаты профилирования упругих свойств приповерхностных слоев грунта с использованием поверхностной волны Рэлея в натуральных условиях. Информация о стратификации акустических параметров связана с зависимостью эффективной глубины проникновения волны Рэлея от частоты. Метод основан на анализе зависимости фазовой скорости и отношения проекций смещения в волне Рэлея от ее частоты в слоистой среде. Соискателем была предложена программа экспериментальных исследований влияния насыщенности приповерхностных слоев жидкостью, а также разработан программный код, реализующий решение задачи реконструкции акустических параметров слоистой среды. Был разработан пакет быстродействующих программ для вычисления фазовой скорости фундаментальной моды волны Рэлея в модели плоскослоистой среды. На основе этого пакета были определены глубина расположения слоев и величины продольной и сдвиговой скорости в них. Поиск этих параметров проводился двумя способами: стохастическим методом Монте-Карло и градиентным методом Ньютона.

В работе приведены результаты нескольких серий натуральных экспериментов с использованием волн Рэлея. В первой серии проведено сравнение параметров среды в

сухой летний период и в дождливый осенний период. Возбуждение поверхностных волн в этой серии проводилось импульсным и вибрационным методами. Было выполнено профилирование скоростей продольных и сдвиговых волн. Результаты профилирования позволили проследить характер изменения скоростей объемных волн и коэффициента Пуассона при изменении насыщения грунта водой.

Во второй серии экспериментов проведена реконструкция упругих параметров слоев при контролируемом насыщении грунта водой: проводилось искусственное увлажнение среды известным объемом жидкости, выливаемой равномерно на диагностируемую площадь. Были реконструированы исходные профили, профили после увлажнения грунта ≈ 42 л/м² и при практически полном насыщении верхних слоев грунта после увлажнения грунта ≈ 100 л/м² воды. Проведенные измерения позволили проследить изменения во времени скоростей волны сдвига и скорости продольной волны в слоях при контролируемом насыщении грунта. Проведено обсуждение результатов эксперимента.

В §3.3 приводится заключение к третьей главе.

В заключении к диссертации сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы. Наиболее существенные результаты работы, обладающие научной новизной и практической значимостью, состоят в следующем.

1. Методом резонансной акустической спектроскопии проведено исследование линейных и нелинейных характеристик консолидированной горной породы в зависимости от насыщенности пор жидкостью. Высокая точность измерений позволила выделить стадии насыщения: конденсацию, образование менисков и монотонное заполнение пор жидкостью, которым отвечают качественные изменения акустических характеристик. Обнаруженная частотная дисперсия фактора потерь при насыщенности, близкой к полной, дает объяснение имеющихся в литературе расхождений в моделях затухания звука в донных осадочных породах.

2. Выполнены исследования по медленной динамике объемных и сдвиговых деформаций при возбуждении (накачке) на продольной и крутильной модах. 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 зернами в случае сыпучих сред.

3. Предложен и апробирован новый метод измерений механоакустических свойств неконсолидированных сред, имеющий преимущества по сравнению с известными. Метод основан на регистрации относительного изменения резонансных частот колебаний контейнера, заполненного сыпучим материалом. Проведенные на его основе исследования модельных гранулированных сред позволили обнаружить неизвестные ранее зависимости модулей объемной и сдвиговой жесткости от амплитуды деформаций.

4. Предложены и апробированы в натуральных условиях методы межскважинного фазового профилирования на когерентных SH-волнах и профилирования приповерхностных слоев на основе совместного анализа частотных зависимостей фазовой скорости и отношения проекций смещения волны Рэлея. Экспериментально показано, что оба метода позволяют разрешить слоистую структуру при слабом контрасте геоакустических параметров (до единиц процентов).

Достоверность результатов диссертационной работы определяется соответствием данных аналитических расчетов и численного моделирования, физической и математической обоснованностью используемых моделей, а также наличием тесной

взаимосвязи результатов экспериментов, полученных рядом ведущих специалистов у нас в стране и за рубежом с результатами, представленными в диссертации.

Результаты диссертации Манакова С.А. могут быть рекомендованы для использования в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Институте прикладной физики РАН, Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, Акустическом институте им. Н.Н. Андреева, Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН, а также в других научных и учебных центрах, где ведутся исследования по близкой тематике.

Рецензируемая работа не лишена некоторых недостатков:

1. В работе присутствуют опечатки и незначительные ошибки. Наиболее существенным является отсутствие в диссертации рисунка 3.10 с результатами реконструкции слоев, о котором упоминается в тексте диссертации на странице 116. (Этот рисунок приведен в автореферате.)
2. Из текста диссертации не ясно, как из общего спектра собственных колебаний резонатора в работе выделялись продольные и крутильные моды колебаний резонатора. В диссертации не приведена методика определения скорости продольных и сдвиговых упругих волн исследуемого материала по результатам измерения собственных частот резонатора.
3. В диссертации не приведены оценки точности измерения упругих свойств, исследуемых в диссертации с помощью резонансных и импульсных методов.
4. Для выражения (5) на странице 52 диссертации, описывающего амплитудную зависимость относительного изменения частоты резонатора, не указан интервал деформаций, в котором оно справедливо.
5. Для описания диссипативных свойств исследуемых сред автор использует термины «фактор потерь», «коэффициент поглощения». В тексте диссертации не сказано, в чем их отличие, не приводится их размерность и методы их определения.
6. Формула для определения добротности резонатора при конечных деформациях, приведенная на странице 26, ошибочна.

Однако указанные выше замечания не изменяют общую высокую положительную оценку диссертационной работы Манакова С. А.

Оценивая работу в целом, можно заключить, что диссертация выполнена на высоком экспериментальном и теоретическом уровне, и представляет собой законченное научное исследование, приведшее к ряду новых научных результатов в области исследования нелинейных эффектов при распространении акустических волн в мезо-структурно-неоднородных материалах.

Основные результаты диссертационной работы Манакова С. А. представлены в 25 публикациях (из них 8 статей в реферируемых изданиях и 17 докладов и тезисов докладов), неоднократно докладывались на российских и международных конференциях и хорошо известны научному сообществу.

Автореферат диссертации достаточно полно и точно раскрывает содержание работы.

Представленные результаты исследований Манакова С. А. характеризуют его как квалифицированного ученого, диссертационная работа которого по объему, научной значимости и форме представления полученных результатов соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.06 – акустика.

Диссертация и отзыв обсуждены и одобрены на семинаре кафедры акустики физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова 8 февраля 2017 года.

Заместитель заведующего кафедрой акустики
физического факультета МГУ, профессор,
доктор физико-математических наук



А.И. Коробов

Подпись А.И. Коробова удостоверяю.

Заместитель декана
физического факультета МГУ, профессор,
доктор физико-математических наук



А.В. Козарь

Контактная информация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Почтовый адрес: 119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, д. 1, стр. 2

Адрес электронной почты: info@physics.msu.ru

Телефон: (495) 939-18-21

Веб-сайт: <http://www.phys.msu.ru>