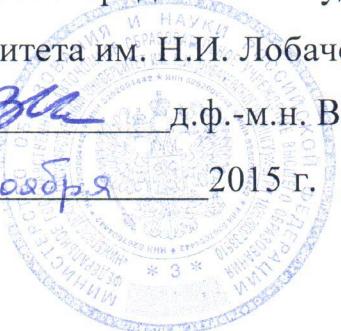


УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и инновациям Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

В.Б. Казанцев

«13» ноября 2015 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

**федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования**

**«Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»
на диссертацию Александровой Надежды Ивановны**

«Нестационарные волновые процессы в блочных и упругих средах с учётом вязкости и внешнего сухого трения», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 –
«Механика деформируемого твердого тела»

Актуальность темы диссертационной работы

Разработка моделей и методов расчета динамического поведения геоматериалов необходима для прогнозирования последствий землетрясений и техногенных воздействий на подземные и наземные сооружения. При этом особенности распространения волн существенным образом определяются моделями описания горных пород верхней части земной коры. Исторический процесс формирования горных пород сопровождался появлением трещин, разломов, что приводило к образованию блочной структуры породных массивов. Блочное строение земной коры проявляется на всех масштабных уровнях – от размеров кристаллических зерен до тектонических плит, образующих материки. До недавнего времени многие задачи распространения волн в горных породах формулировались и решались в терминах однородной упругой среды, что позволи-

ло получить для ряда задач приближенные аналитические решения, а для других – численные решения. В то же время экспериментально показано, что влияние блочности геосреды и реологических свойств прослоек приводит к существенному изменению параметров процесса распространения сейсмических волн. Значительное влияние на этот процесс оказывает внешнее сухое трение, которое возникает при смещении блоков по их контактным границам. Влияние сухого трения проявляется и в технологических процессах (забивка свай, бесструннейная прокладка коммуникаций). Поэтому при математическом моделировании необходимо учитывать блочную структуру горных пород, свойства прослоек и внешнее сухое трение.

Решению этой актуальной и важной проблемы посвящена диссертационная работа Н.И. Александровой, в которой разрабатываются математические модели, описывающие динамику блочных упругих сред с учетом вязкости и сухого трения, развиваются методы решения нестационарных задач для геосред и оцениваются параметры сейсмических возмущений в породных массивах посредством введения блочно-иерархической структуры горных пород.

Структура и содержание диссертации

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 283 наименований. Работа изложена на 276 страницах, содержит 123 рисунка и 3 таблицы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы основополагающие идеи и цель работы, научная новизна и практическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан обзор имеющихся теоретических и экспериментальных исследований в блочных средах и по влиянию внешнего сухого трения между блоками на процесс распространения волн в конструкциях. Проанализированы имеющиеся в литературе аналитические и численные методы решения задач распространения нестационарных волн деформаций в блочных и упругих средах, сформулированы задачи исследования.

Во второй главе разработаны одномерные и двумерные математические модели, описывающие вязкоупругое нестационарное деформирование блочных сред, численные и аналитические методы решения динамических задач с использованием созданных моделей.

Для описания одномерного деформирования блочных сред автором рассмотрены две модели: цепочка упругих стержней и цепочка масс, соединенных прослойками. Деформирование прослоек описывается на основе модели в виде комбинации упругих пружин и вязких демпферов, соединенных последовательно и параллельно (модели Кельвина-Фойгта и Максвелла). Исследованы также модели цепочек стержней и масс с чередующимися свойствами вязкоупругих прослоек.

На основе одномерных моделей вязкоупругого деформирования блочных сред с помощью известного метода Л.И. Слепяна автором получены асимптотики низкочастотных нестационарных возмущений в блочных иерархических средах при действии импульсного нагружения. Предложен подход к получению аналитических оценок спектральной плотности возмущений и выведены оценки для ряда рассмотренных моделей. Автором получены конечно-разностные решения этих же задач, а также решены новые задачи, для которых получить аналитические оценки не удается (например, для модели вязкоупругой прослойки Максвелла). В результате сравнения численных и аналитических решений показана применимость последних для оценки динамических возмущений и оценки спектральной плотности возмущений в иерархической блочной среде.

В диссертации проведено сопоставление низкочастотных волновых процессов в системе стержней и в цепочке масс и показано, что динамическое поведение блочной среды может быть приближенно описано как движение жестких блоков за счет деформируемости прослоек между ними.

Установлено, что влияние вязких прослоек в одномерной блочной среде приводит к тому, что высокочастотные волны, бегущие позади фронта низкочастотной волны, быстро затухают.

С целью обоснования применимости к реальным объектам математических моделей, предложенных Александровой Н.И., в работе проведено сравнение аналитических и численных решений с экспериментальными данными, полученными в лабораторных экспериментах по ударному нагружению цепочки стальных стержней, разделенных различными прослойками (пенопласт, резина, линолеум) и стопки силикатных кирпичей с резиновыми прослойками и без прослоек. В результате сравнения продемонстрирована возможность адекватного математического моделирования физического процесса распространения одномерных волн в блочно-иерархических средах.

Динамика двумерной блочной среды, как и в одномерном случае, рассматривалась в маятниковом приближении, когда блоки считаются несжимаемыми, а их смещения происходят за счет деформируемости прослоек. Для решения двумерных задач деформирования блочных сред Александровой Н.И. разработан асимптотический подход к обращению преобразований Лапласа и Фурье в задачах нестационарного деформирования дискретно-периодических сред. Этот подход позволяет учесть вклад возмущений в окрестности фронта низкочастотной волны и высокочастотных колебаний за ее фронтом. Кроме того подход позволяет также решать одномерные задачи для дискретно-периодических сред, причем решение получается более точным, чем при использовании метода Л.И. Слепяна.

При аналитическом решении двумерных задач для блочных сред автором впервые получены формулы асимптотического представления функции Ломмеля через функцию Скорера и производной от функции Ломмеля через производную от функции Скорера при больших значениях порядка или аргумента функции. С использованием вышеупомянутого подхода и формул асимптотического представления для функций Ломмеля и Бесселя Н.И. Александровой впервые получены асимптотические решения при больших временах с начала процесса, описывающие нестационарное деформирование двумерной блочной среды без учета вязкости прослоек при сосредоточенном ступенчатом воздействии на безграничную среду (антиплоская задача) и на поверхность блочного полупространства (плоская задача Лэмба).

Александровой Н.И. проведены исследования волноводных свойств в случае плоского деформирования блочной среды, где показано, что аналогично однородной среде в двумерной блочной среде существуют продольные и сдвиговые волны. Определены фазовые и групповые скорости бесконечно длинных и коротких продольных и сдвиговых волн в блочной среде в зависимости от параметров среды и показан вклад каждой волны в результаты численных расчетов распространения нестационарных возмущений в двумерной блочной среде при действии импульсных нагрузок типа «центр расширения», «центр вращения».

Кроме аналитического решения плоской задачи Лэмба для блочной среды, эта же задача решена численно с учетом и без учета вязкости прослоек, показано, что асимптотика качественно и количественно верно описывает результаты численных расчетов. Показано, что в блочной среде с приходом волны Рэлея возникают слабо затухающие высокочастотные колебания, отсутствующие в волне Рэлея в упругом однородном полупространстве. Помимо этого показано, что вязкость прослоек приводит к уменьшению высокочастотных колебаний позади фронта волны Рэлея, что лучше соответствует сейсмограммам, получаемым на практике. Александровой Н.И. проведено численное исследование плоской задачи Лэмба при импульсном и ступенчатом воздействиях, показано, что при всех нестационарных воздействиях основной вклад в волновой процесс в блочной среде вносит низкочастотная волна Рэлея.

В третьей главе разработаны аналитические и численные методы решения нестационарных задач ударного погружения трубы в грунте с учетом внешнего сухого трения.

Предложен аналитический способ решения нелинейной задачи распространения нестационарных продольных волн в трубе, на боковой поверхности которой действует в движущихся сечениях постоянное касательное напряжение (внешняя среда не деформируется). Получено аналитическое решение этой задачи при действии продольной импульсной нагрузки произвольной выпуклой

формы с учетом многократных отражений от торцов трубы. Показано, что данное аналитическое решение совпадает с результатами численных расчетов. Получены инженерные оценки суммарного проскальзывания трубы при многократных отражениях полусинусоидального и прямоугольного импульсов и показано их количественное соответствие аналитическому решению.

Автором получены аналитические решения одномерной в радиальном направлении задачи, описывающие поведение перемещений трубы, взаимодействующей упруго с внешней деформируемой средой, при продольном воздействии, показано, что численные и аналитические решения этой задачи совпадают между собой с большой точностью. Кроме того, аналитические решения дают качественное описание решения двумерной задачи при упругом взаимодействии трубы и среды.

В диссертации конечно-разностным методом исследовано влияние деформируемости среды, окружающей трубу, на процесс распространения волн в трубе и выполнено сравнение расчетов, проведенных по двум моделям с деформируемой и недеформируемой внешней средой. Показано, что существует область параметров, для которой деформируемостью внешней среды, взаимодействующей с трубой по закону сухого трения, можно пренебречь.

Диссидентом разработаны конечно-разностные алгоритмы расчета волновых процессов в трубе с внешним сухим трением с учетом и без учета деформируемости окружающего грунта, в результате проведения большого количества численных расчетов определено влияние на процесс распространения нестационарных возмущений в трубе различных параметров задачи.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Показана возможность моделирования процесса распространения одномерных волн в иерархических блочных средах с использованием аппарата линейной теории вязкоупругости.
2. Получены асимптотические решения задач распространения нестационарных низкочастотных волн в одномерных моделях вязкоупругого де-

формирования блочно-иерархических сред.

3. Проведено исследование вязкоупругого деформирования двумерных блочных сред в плоской постановке при нестационарных воздействиях.
4. Получены аналитические и численные решения задачи о распространение волн в трубе с внешним сухим трением с учетом деформируемости окружающего грунта.

Обоснованность и достоверность, полученных в диссертации результатов, обеспечивается:

- прямым сравнением с экспериментальными данными;
- совпадением численных и аналитических решений;
- сопоставлением с результатами других авторов;
- строгостью математических постановок задач;
- публикацией результатов в авторитетных рецензируемых научных изданиях.

Теоретическая значимость работы состоит в построении новых математических моделей деформирования блочно-иерархических сред, в разработке методов решения динамических задач для блочных упругих сред с учетом вязкости и внешнего сухого трения и решении на этой основе ряда важных в теоретическом и практическом отношении задач геомеханики.

Практическая значимость и рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации

Полученные автором выводы и результаты могут быть использованы при моделировании динамических процессов в земной коре, для разработки теоретических основ мониторинга напряженно-деформированного состояния геосред в областях сильных техногенных воздействий, при исследовании нелинейных деформационно-волновых процессов в блочных массивах горных пород, для отработки процессов бестраншейной прокладки подземных коммуникаций с помощью внедрения металлических труб в грунт. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в таких организациях, как Горный институт УрО РАН, Горный институт КНЦ РАН, ВНИМИ, ИПКОН РАН и других инсти-

туках горного профиля. Модели геосред и полученные на основе этих моделей результаты могут быть использованы в ИДГ РАН, ИФЗ РАН. Выводы и рекомендации, содержащиеся в работе, окажутся полезными и специалистам горнодобывающей промышленности и подземного строительства.

Замечания

1. Желателен сравнительный анализ аналитического и численного подходов к моделированию процессов распространения сейсмических волн в иерархических блочных средах с целью определения «оптимальных» геометрических размеров блоков и физико-механических характеристик прослоек.
2. Утверждение автора о том, что решена обратная задача определения деформационных свойств прослоек недостаточно аргументировано, поскольку не описаны постановка, метод и алгоритм решения обратной задачи (стр. 93).
3. В работе не исследовано влияние нелинейного деформирования прослоек между блоками, характерного для точечного контактного взаимодействия не гладких поверхностей.
4. В работе с большой полнотой теоретически и экспериментально исследованы закономерности распространения волн в одномерных и двумерных модельных блочных средах. Встает вопрос, как полученные закономерности проявляются в трехмерных задачах для реальных блочных структур?
5. В диссертации блоки рассматриваются как регулярные структуры. На самом деле это слишком большая идеализация. Кроме этого хотелось бы видеть в блочных моделях учет реального трения и оценить его влияние на изменение кинематических параметров.

По работе имеются замечания редакционного характера:

1. На рис. 2.1.32, 2.1.34 не построена сетка по осям ординат.
2. Размерные величины приведены на некоторых рисунках в разных системах, например, с и мс. Лучше все размерные величины приводить в системе СИ, т.е. $mc=0.001c$.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку дис-

сертации.

Заключение

Давая общую оценку диссертации, можно констатировать, что изложенные в работе научные результаты относятся к актуальной области науки о распространении сейсмических волн в геосредах. Актуальность темы работы подтверждается выполнением ее при поддержке грантов, перечень которых приведен во введении.

К достоинствам работы относится комплексный подход к построению математических моделей и разработке методов решения задач на основе этих моделей, основанный на применении аналитических, численных и экспериментальных методов исследования.

В работе используется единый методологический подход к постановке, решению и анализу проблемы распространения сейсмических волн в породных массивах и конструкциях, объединяющий в единое целое широкий круг одномерных и двумерных задач нестационарного деформирования геосред.

Результаты диссертации в полной мере отражены в 32 научных трудах соискателя, из которых 14 опубликованы в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций, и в библиографические базы Web of Science и Scopus. Результаты диссертации докладывались на многих российских и международных конференциях и достаточно подробно освещены в публикациях автора.

Содержание диссертации соответствует специальности 01.02.04. – «Механика деформируемого твердого тела». Автореферат достаточно полно и правильно отражает основные положения и выводы диссертационной работы.

Автором диссертационной работы решена комплексная научная задача по разработке новых математических моделей для расчета распространения нестационарных волн в структурно-неоднородных геосредах и разработке методов

решения задач на основе этих моделей. Совокупность результатов, изложенных в диссертации Н.И. Александровой, можно квалифицировать как серьезное научное достижение в области расчетов сейсмических волн в породных массивах.

Представленная диссертационная работа Н.И. Александровой «Нестационарные волновые процессы в блочных и упругих средах с учетом вязкости и внешнего сухого трения» выполнена на высоком научном уровне, соответствует требованиям пп. 9–11, 13 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) в части, касающейся присуждения ученой степени доктора наук, а ее автор Н.И. Александрова заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании Ученого совета НИИМ Нижегородского университета (протокол № 8 от 12.11.2015 г.).

Директор «Научно-исследовательского института механики»
ФГАОУ ВО «Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»,
доктор физико-математических наук
(01.02.04 – механика деформируемого твердого тела),
профессор

Леонид Александрович Игумнов

603950, Нижний Новгород,
пр. Гагарина, 23, корп. 6;
Тел.:(831)465-76-55;
E-mail: igumnov@mech.unn.ru