

ОТЗЫВ

научного консультанта на диссертационную работу

Надежды Ивановны Александровой

«Нестационарные волновые процессы в блочных и упругих средах с учетом вязкости и внешнего сухого трения», представленную в диссертационный совет Д 003.054.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»

Разработка расчетных моделей является важным элементом фундаментальной научной проблемы механики горных пород и состоит в описании закономерностей деформирования породного массива с учетом его блочного строения, как в статических условиях, так и в динамических. В последнее время представления о породном массиве, как о сложной структурированной иерархической среде становятся основой для описания его поведения в различных природных и технологических процессах, таких как подготовка землетрясений, оползней, горных ударов, распространение сейсмических волн, разрушение при взрыве, гидроразрыве.

Конструктивными в исследовании влияния структуры на механику горных пород явились представления М.А. Садовского о горном массиве, как о блочно-структурированной среде с вполне определенной иерархией размеров, составляющих её блоков. Такие представления позволяют строить расчетные модели блочных сред последовательно увеличивающейся сложности. Часто прослойки между блоками представлены более слабыми, трещиноватыми породами. Наличие таких податливых прослоек приводит к тому, что деформирование блочного массива как в статике, так и в динамике происходит в основном за счет деформации прослоек. Это подтверждают, в частности, наблюдения, согласно которым при крупных взрывах в протяженных выработках в массивах горных пород с крупными трещинами и разломами возникают остаточные разнонаправленные угловые смещения, что свидетельствует о независимом движении структурных элементов массива.

С учетом этого член-корр. РАН В.Н. Опариным было предложено рассматривать процесс динамического деформирования в приближении «жесткие блоки – податливые прослойки между блоками». Такое приближение, названное им маятниковым, позволяет сравнительно просто рассматривать вопросы распространения сейсмических волн в блочных средах, определять особенности их поведения и сравнивать их с расчетными данными, полученными по теоретическим моделям механики сплошных сред. Модельные эксперименты, проведенные В.И. Востриковым в ИГД СО РАН, по-

казали, что в блочных средах при ударном возбуждении наблюдаются изменения спектра колебаний волны по мере ее распространения. Высокочастотные колебания, фиксируемые на первых блоках, в дальнейшем затухают и в блочной среде распространяются преимущественно низкочастотные волны, называемые В.Н. Опариным маятниковыми.

Надежда Ивановна Александровна подключилась к экспериментальным и теоретическим исследованиям по ударному возбуждению сейсмических волн в модельных блочных средах с начала их проведения в ИГД СО РАН. Ее задачей было разработка теоретических моделей, соответствующих проводимым экспериментам, анализ получаемых решений и проведение сравнения с экспериментальными данными. Ряд таких моделей представлен в диссертационной работе. На примере одномерных теоретических моделей сборки упругих стержней и цепочки масс, соединенных упругими пружинами, было показано, что модель «массы – пружины» достаточно хорошо может описывать низкочастотную волну, возникающую при ударном возбуждении в сборке упругих стержней. Экспериментальные исследования распространения волн в стержневой сборке с податливыми прослойками из разных материалов показали, что кроме низкочастотной волны в ней наблюдается распространение и высокочастотных колебаний с частотой продольного резонанса стержней. Замечено, что такие колебания распространяются с меньшей скоростью и интенсивно затухают со временем. Для того, чтобы количественно описать эти эффекты, было предложено использовать вязкоупругие модели деформирования прослоек. Было проведено сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей ускорения от времени стержней в системе с прослойками. Расчеты проводились с использованием стержневой модели с вязкоупругими прослойками, параметры деформирования которых подбирались так, чтобы обеспечить удовлетворительное согласие данных теории и эксперимента. Особое внимание при этом обращалось на соответствие величин скорости распространения низкочастотной волны, её периода и коэффициента затухания. Анализ теоретических и экспериментальных кривых показал, что при этом удастся получить удовлетворительное описание распространения низкочастотных маятниковых волн в одномерной блочной среде. Этот результат был подтвержден при сравнении данных эксперимента по возбуждению колебаний в стопке кирпичей и теоретических расчетов по модели цепочки масс, соединенных вязкоупругими пружинами. Удовлетворительные результаты теоретического описания с использованием модели «массы – вязкоупругие пружины» были получены также при обработке данных экспериментов в сборках стальных стерж-

ней более сложной иерархической конфигурации с периодически расположенными пенопластовыми и резиновыми прослойками.

Полученные результаты подтверждают первое научное положение диссертации, что динамическое поведение блочных массивов горных пород может быть приближенно описано как движение жестких блоков за счет податливости прослоек между ними. Для описания деформационных свойств прослоек можно использовать модели в виде комбинации упругих пружин и вязких демпферов.

Важным результатом, полученным при решении задачи ударного возбуждения колебаний в цепочке масс, соединенных вязкоупругими пружинами, является получение асимптотических решений, соответствующих большим временам распространения волн.

Наряду с одномерными моделями блочных сред в работе изучается распространение нестационарных волн в двумерных блочных средах, имеющих дискретно-периодическое строение. Динамика блочной среды, рассматривается в маятниковом приближении, когда блоки считаются несжимаемыми, а их смещения происходят за счет сжимаемости прослоек. Простейшей расчетной моделью в этом случае может служить регулярная квадратная решетка масс, соединенных вязкоупругими пружинами. Исследовано антиплоское и плоское движение блочной среды. Показано, что дисперсионные характеристики волн, распространяющихся в плоском блочном пространстве, усложняются по сравнению с упругой средой. Продольные и сдвиговые волны распространяются с дисперсией, которая отсутствует в упругой среде. Появляются резонансные частоты, которые формируют спектр колебаний, возникающих в блочной среде при локальном импульсном воздействии. Так как резонансные частоты определяются структурными параметрами блочной среды, такими как масса блоков, жесткость и вязкость пружин, моделирующих прослойки между блоками, то возникает возможность их определения по спектру возмущений в блочной среде под действием известной импульсной нагрузки.

Исследование задачи Лэмба для блочной среды показало, что отличие в решениях от задачи Лэмба для непрерывной среды особенно сильно проявляется в районе фронта волны Рэлея, а именно – появляются высокочастотные осцилляции возмущений, отсутствующие в непрерывной среде. На границе блочной среды, заключенной между фронтами продольной и поперечной волн, наблюдается качественное и количественное соответствие результатов для блочной и однородной среды. Исследование задачи Лэмба для блочной среды с учетом вязкости показало, что наличие вязкости приводит к уменьшению высокочастотных медленно затухающих колебаний позади

фронта волны Рэлея, которые отсутствуют на реальных сейсмограммах. Полученный результат свидетельствует о необходимости учета вязкости прослоек в блочной модели горных пород при расчете сейсмических волн.

Глава 3 посвящена моделированию ударного погружения трубы в грунт с внешним сухим трением. Такие задачи возникают при разработке многих технологических процессов: забивки и ударного извлечения свай, бестраншейной прокладки подземных коммуникаций с помощью забивания металлических труб в грунт, при определении поведения подземных трубопроводов при землетрясениях. Поэтому одной из актуальных задач является изучение влияния на волновой процесс сухого трения внешней среды и боковой поверхности трубы или стержня. Аналогичная задача может возникать при учете сдвиговых смещений вдоль границы блоков.

Задача рассматривается в известной постановке динамических задач с сухим трением в двух вариантах описания поведения внешней среды. Это неподвижная внешняя среда и среда, допускающая упругий продольный сдвиг. С помощью интегральных преобразований в первом варианте удастся получить аналитические решения задачи для трубы, к которой приложена сила внешнего сухого трения постоянной амплитуды и продольный импульс произвольной формы. Решения получены как для полубесконечной трубы, так и для трубы конечной длины с учетом отражений от торцов. Получены инженерные оценки суммарного проскальзывания трубы при многократных отражениях полусинусоидального и прямоугольного импульсов. Разработаны конечно-разностные алгоритмы расчета волновых процессов в трубе с внешним сухим трением с учетом и без учета деформируемости окружающего грунта и проведены численные расчеты в широком диапазоне изменения параметров задачи. Установлено, что величина проскальзывания трубы конечной длины прямо пропорциональна квадрату амплитуды импульса, его длительности и обратно пропорциональна силе трения. Величина амплитуды импульса, при которой труба начинает проскальзывать, линейно зависит от силы трения. Существует область параметров, для которой расчеты могут проводиться без учета деформируемости грунта.

В качестве научного консультанта я положительно характеризую личностные качества Н.И. Александровой как ученого, ее целеустремленность, настойчивость и трудолюбие при получении аналитических и численных решений поставленных задач.

Хорошее базовое образование на механико-математическом факультете НГУ позволило ей после окончания университета и поступления в ИГД СО РАН успешно провести исследования ряда динамических задач распространения волн в цилиндрических оболочках, взаимодействующих с жидкостью, участвовать в разработке расчет-

ных схем и программ для определения разрушающего действия взрыва цилиндрических и сферических зарядов в горных породах. Накопленный опыт делает её высококвалифицированным специалистом в решении динамических задач механики деформируемого твердого тела, хорошо владеющим аналитическими и численными методами анализа.

Результаты, изложенные в диссертации, апробированы Н.И. Александровой на различных конференциях, опубликованы в 14 научных работах в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ. Многие результаты вошли в отчеты по четырем проектам РФФИ.

Полагаю, что выполненная работа соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК России, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Надежда Ивановна Александровна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Научный консультант,

гнс лаборатории разрушения горных пород и механики взрыва ИГД СО РАН

д.ф.-м.н.



Е.Н. Шер

Подпись Е.Н. Шера заверяю:

Ученый секретарь ИГД СО РАН, к.т.н.



А.П. Хмелинин