

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки Института  
горного дела им. Н.А. Чинакала  
Сибирского отделения Российской  
академии наук, к.т.н.

А.С. Кондратенко

11 января 2019 г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

**Ченцова Евгения Петровича**

«МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ  
ПРОЦЕССОВ В СТРУКТУРНО НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое  
моделирование, численные методы и комплексы программ»

**Актуальность темы выполненной работы.** Диссертационная работа Ченцова Е.П. посвящена изучению волновых процессов в неоднородных средах, моделирующих горную породу. Задача описания деформационных процессов в геосредах остается очень актуальной на протяжении последних десятилетий. Для введения неоднородности использован подход, в котором среда представляется в виде массива однородных блоков, разделенных податливыми прослойками. Такой подход к моделированию динамических процессов в горных породах является корректным, поскольку геосреда может быть представлена как множество вложенных блоков, разделенных трещинами или прослойками, причем деформируемость горного массива в основном определяется деформацией прослоек. Вариация свойств прослоек позволяет моделировать волновые процессы в средах различного типа, в частности – в насыщенных жидкостью (например, нефтью) породах, что является важной задачей в связи с интенсивным развитием технологии гидроразрыва пласта.

При изучении сред с блочной структурой большой интерес представляет и эффект резонанса, возникающий при колебаниях определенного типа на резонансной частоте за счет увеличения амплитуды колебания блоков. Анализ практической достижимости собственных частот является актуальной задачей в связи с перспективами использования метода резонансного разрушения структурно неоднородных сред.

Таким образом, научная проблема, которой посвящена диссертационная работа Ченцова Е.П. является актуальной.

### **Общая характеристика работы.**

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Каждая глава в конце содержит выводы.

**Во введении** представлена цель диссертации, поставлены задачи работы, показана актуальность темы исследований и новизна полученных результатов.

**Первая глава** имеет обзорный характер и содержит два раздела. В разделе 1.1 диссертант описывает различные методы моделирования структурно неоднородных сред. Представлены непрерывные и дискретные подходы к описанию динамических процессов в геосредах. Особое внимание удалено концепции М.А. Садовского, согласно которой горная порода рассматривается как множество вложенных друг в друга блоков. Раздел 1.2 содержит обзор методов численной реализации моделей блочной среды: методы конечных разностей, методы конечных элементов, методы граничных элементов, методы дискретных элементов и гибридные методы.

**Во второй главе** представлен дискретный подход к моделированию волновых процессов в средах блочного типа. В качестве колебательной системы исследуется моноатомная цепочка Бравэ. В разделе 2.1 представлена общая постановка задачи. В разделе 2.3 исследована модель продольных колебаний и в разделе 2.4 – модель вращательных и поперечных колебаний. Главное внимание удалено эффекту резонанса. Для анализа его практической достижимости построены спектральные портреты, позволяющие проанализировать изменение амплитуды колебаний в окрестности резонансных частот. В случае вращательных и поперечных колебаний показано существование характерной резонансной частоты, зависящей исключительно от механических параметров модели. Показано, что при стремлении числа частиц в цепочке Бравэ к бесконечности определяющие уравнения переходят в уравнения континуума Коссера.

**В третьей главе** представлен непрерывный подход к моделированию колебательных процессов в блочной среде. В разделе 3.1 разработаны одномерная и двумерная модели блочных сред, в которых однородные упругие блоки разделены упругими податливыми прослойками. Для численной реализации определяющих уравнений в двумерном случае использован метод двуциклического расщепления по пространственным координатам. В блоках и прослойках использованы модификации схемы распада разрыва Годунова. Дальнейшие разделы (3.2 – 3.6) посвящены моделированию различных свойств прослоек. Раздел 3.2 описывает вязкоупругое взаимодействие, разделы 3.3 и 3.4 описывают прослойки, которые по-разному реагируют на растягивающие и сжимающие напряжения. Наиболее развитая модель представлена разделом 3.5, в котором прослойки

являются флюидонасыщенными, причем пористый скелет обладает вязкоупругими свойствами и учитывает эффект, при котором по достижению критического уровня сжимающей деформации поры замыкаются, блокируя внутри себя жидкость и не позволяя ей продолжить движение.

Каждый из разделов также содержит численную реализацию определяющих уравнений. Для моделей прослоек, не насыщенных жидкостью, используется подход, основанный на бездиссипативной схеме Г.В. Иванова. Для моделей с флюидонасыщенными прослойками разработана гибридная схема Годунова-Иванова.

**В четвертой главе** описан разработанный комплекс программ, а также представлены результаты тестовых расчетов. Параллельная организация алгоритмов, основанная на декомпозиции блочной среды на горизонтальные слои, представлена разделом 4.1. Раздел 4.2 содержит информацию об эффективности вычислений и краткие выводы о характере отношения времени коммуникации между процессами к времени выполнения программы. В разделе 4.3 представлены результаты численных расчетов для двух задач: поворота центрального блока вокруг центра масс и воздействие локализованного вращательного момента на левой границе расчетной области.

**В заключении** диссертационной работы представлены основные результаты и подведены итоги исследования. Кроме того, представлен план дальнейшего ее развития.

**Список литературы** содержит публикации по теме диссертации и в полной мере характеризует выбранное автором научное направление.

**Публикации.** Научные результаты, представленные соискателем, достаточно полно опубликованы в 20 научных работах, среди которых 3 – статьи в журналах, рекомендованных ВАК для представления результатов кандидатской диссертаций. Соискатель является соавтором зарегистрированного программного комплекса для численного моделирования динамических процессов в многоблочных средах на кластерных системах №2016615178, приравниваемого к дополнительной публикации из списка ВАК.

### **Новизна исследования и результатов.**

**1.** Разработаны новые математические модели для описания динамических процессов в блочных средах. Предложены следующие модели прослоек: упругие, вязкоупругие, разномодульные и флюидонасыщенные прослойки с пористым скелетом. В моделях прослоек учтена масса прослойки, которая оказывает значимое влияние на поведение среды.

**2.** Разработан алгоритм, численно реализующий определяющие уравнения блочной среды. Особенностью алгоритма является отсутствие диссипации энергии в схеме и относительная простота его реализации на программном уровне.

**3.** Создан комплекс программ, в которых используются алгоритмы распараллеливания, позволяющий численно решать задачи распространения волн в средах, состоящих из упругих блоков, разделенных прослойками, обладающими различными свойствами.

**4.** Доказана практическая достижимость особой резонансной частоты вращательного движения, связанная исключительно с механическими свойствами среды и не зависящая от ее размеров.

**Теоретическая значимость** работы состоит в создании новых математических моделей деформирования блочных сред, в разработке методов решения динамических задач для блочных геосред с учетом различных свойств прослоек и решении на этой основе ряда важных в теоретическом и практическом отношении задач геомеханики.

### **Практическая значимость**

Полученные автором выводы и результаты могут быть использованы при моделировании динамических процессов в коре Земли, для разработки теоретических основ мониторинга напряженно-деформированного состояния породных массивов в областях сильных техногенных воздействий, для исследования нелинейных деформационно-волновых процессов в блочных массивах горных пород, насыщенных нефтью.

**Обоснованность и достоверность работы** обеспечиваются квалифицированным использованием фундаментальных законов механики деформируемого твердого тела, строгостью вывода используемых моделей и выполнением для них законов сохранения энергии, соответствием между проведенными одномерными расчетами и точными решениями.

Основные научные результаты докладывались на 16 международных, всероссийских и региональных конференциях.

**Соответствие паспорту научной специальности.** Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» и отвечает формуле специальности, как минимум, по следующим пунктам областей исследования:

Пункт 1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.

Пункт 3. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.

Пункт 4. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

Пункт 5. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

## **Замечания по диссертационной работе.**

1. В диссертации широко представлены линии уровня различных возмущений, что позволяет видеть фронты волн, реализующихся в блочной среде. Однако анализ зависимости амплитуды возмущений и скоростей волновых фронтов от параметров прослоек отсутствует. Для наглядности было бы желательно представить зависимости от времени возмущений в различных точках блочной среды для разных значений параметров прослоек.
2. На странице 50 диссертационной работы написано «...можно установить, что  $\omega_0 = \sqrt{a/J}$ . Это единственная собственная частота бесконечной цепочки бесконечной длины, которая связана с вращательным движением элементов. Других резонансных частот, связанных с вращательным движением элементов, нет». Не указано, это собственная частота бесконечно длинных волн или коротких волн.
3. На странице 53 диссертационной работы написано «Построенные спектральные портреты для цепочек с различными длинами указывают на достижимость характерной частоты  $\omega_0$ ». Не приведено ни одного расчета, демонстрирующего резонансный рост возмущений в цепочке с увеличением времени при действии гармонической нагрузки с резонансной частотой.
4. На странице 102 диссертационной работы написано «Расчеты также согласуются с результатами эксперимента [175], в котором анализировалось распространение волн в среде из блоков плексиглаза с относительно толстыми и тонкими прослойками». Не указано, в чем состоит качественное соответствие с результатами работы [175].
5. В тексте диссертации есть небольшое количество опечаток и неточностей.
  - 1) На странице 14 написано «Автор [42]». В ссылке [42] три автора.
  - 2) На странице 19 в последней строке написано «[14, 14, 61]». Два раза указана одна и та же ссылка.
  - 3) Страница 50, рисунок 2.7. Не указаны единицы измерения по осям.
  - 4) Страница 99, таблица 4.1. Написано «10.  $t_{imp}$  Период колебаний, сек», «13.  $A_{imp}$  Амплитуда колебаний, Н·м·с». Не указано, период колебаний чего, амплитуда колебаний чего.
  - 5) Страница 110. Рисунки 4.20 и 4.21, рассчитанные для разных толщин прослоек, совершенно не отличаются.
  - 6) Используются одни и те же обозначения для разных величин. Например,  $\omega_0$  – частота,  $\omega_0$  – угловая скорость.

## **Заключение о работе.**

Диссертационная работа Ченцова Е.П. «Математическое моделирование колебательных процессов в структурно неоднородных средах» была обсуждена и получила положительную оценку на заседании семинара

лаборатории механики взрыва и разрушения горных пород ИГД СО РАН под руководством Ефимова В.П. от 14 декабря 2018 года, протокол № 6.

Диссертация Ченцова Евгения Петровича является законченной научно-квалификационной работой по актуальной теме в области моделирования волновых процессов в средах блочного типа. Положения, выносимые на защиту, сформулированы отчетливо. Полученные результаты и выводы обоснованы, являются новыми, имеют научное и прикладное значение и полностью отражены в публикациях автора. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию. Указанные выше замечания не снижают положительную оценку представленной работы.

Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Работа удовлетворяет всем требованиям Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Соискатель Ченцов Евгений Петрович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук (ИГД СО РАН)

Российская Федерация, 630091, Новосибирская область,  
г. Новосибирск, Красный проспект, д.54

Телефон: +7-(383)-205-30-30, доб. 100

Адрес электронной почты: mailigd@misd.ru

Адрес официального сайта в сети интернет: <http://www.misd.ru/>

Отзыв составила главный научный сотрудник лаборатории механики взрыва и разрушения горных пород ИГД СО РАН, д.ф.-м.н. по специальности 01.02.04 (механика деформируемого твердого тела)

Алексеева Александрова Надежда Ивановна

Заведующий лабораторией механики взрыва и разрушения горных пород ИГД СО РАН, д.ф.-м.н. по специальности 01.02.04. (механика деформируемого твердого тела)

Ефимов Ефимов В.П.  
Виктор Прокопьевич

09 января 2019 года