

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Ченцова Евгения Петровича «Математическое моделирование колебательных процессов в структурно неоднородных средах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертация посвящена построению математических моделей динамики блочных сред, а также разработке вычислительных алгоритмов для исследования колебательных процессов в структурно неоднородных материалах.

Актуальность темы исследований обусловлена необходимостью разработки математических моделей, позволяющих достоверно описывать поведение геосред при динамических воздействиях. Деформируемость горных пород, представляющих собой множество вложенных друг в друга блоков, описывается через деформируемость прослоек. Сами прослойки при этом могут обладать широким диапазоном различных свойств, оказывающих значимое влияние на распространение возмущений. Особый интерес представляет моделирование процесса гидроразрыва пласта, который представляет собой сильное динамическое воздействие на насыщенную нефтью геосреду.

Не меньшей актуальностью обладает задача разрушения неоднородных материалов с помощью генераторов колебаний. Оценка практической достижимости резонансной частоты, зависящей исключительно от механических параметров среды, позволит сделать выводы о возможности ее использования для эффективного разрушения материала. Примером такой среды могут служить ледяные торосы, плохо поддающиеся традиционным способам воздействия.

Структура диссертации и общая характеристика работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка используемой литературы из 195 наименований.

Первая глава диссертационной работы содержит обзор литературы по теме исследования. В разделе 1.1 представлены исследования, посвященные моделированию волновых процессов в структурно неоднородных средах. Представлены дискретный и непрерывный подходы к описанию геосред, описаны преимущества и недостатки разработанных ранее математических моделей. В разделе 1.2 приведены различные методы численной реализации моделей блочных сред: методы конечных разностей, методы конечных элементов, методы граничных элементов, методы дискретных элементов и гибридные методы. Описаны случаи, в которых целесообразно использование конкретного численного метода.

Вторая глава посвящена дискретному моделированию колебательных процессов в одномерной линейной цепочке, состоящей из материальных точек одинаковой массы и последовательно соединенных пружинами. Общая постановка задачи представлена разделом 2.1. Для анализа амплитуд колебаний в окрестностях собственных частот используются спектральные портреты, технология построения которых представлена разделом 2.2. С помощью спектральных портретов производится оценка практической достижимости резонансных частот. Малый размер пятна, соответствующий резонансной частоте, говорит о том, что при частоте, близкой к собственной, амплитуда колебания будет недостаточной для разрушения среды. Раздел 2.3 содержит модель продольных колебаний линейной цепочки с различными способами закрепления ее концов. Показано, что все собственные частоты такой цепочки имеют одинаковую практическую достижимость и в предельном переходе при стремлении числа элементов к бесконечности совпадают с продольными колебаниями однородного упругого стержня.

Раздел 2.4 описывает модель вращательных и поперечных колебаний линейной цепочки. Показано существование характерной резонансной частоты, зависящей исключительно от механических параметров модели и не зависящей от размеров образца. Построенные спектральные портреты указывают на практическую достижимость данной резонансной частоты. В предельном переходе при стремлении числа элементов к бесконечности уравнения цепочки переходят в одномерные уравнения континуума Коссера, для которых ранее было показано существование характерной резонансной частоты, связанной с вращательным движением элементов.

В третьей главе построены непрерывные модели блочных сред, состоящих из упругих блоков, разделенных обладающими различными свойствами податливыми прослойками. Наиболее простой случай представлен разделом 3.1, в котором прослойки сделаны из упругого материала. Движение блоков описывается системой уравнений однородной изотропной упругой среды. Определяющие уравнения прослоек учитывают массу прослойки, а также продольную и поперечную жесткость. Численный метод основан на двуциклическом расщеплении по пространственным переменным. Уравнения в блоках решаются с помощью схемы распада разрыва Годунова с предельной реконструкцией. Численная реализация определяющих уравнений для прослоек основана на идее неявной бездиссипативной схемы Г.В. Иванова.

Дальнейшие разделы главы содержат математические модели и алгоритмы, численно реализующие определяющие уравнения моделей. Раздел 3.2 представляет прослойки, обладающие вязкоупругими свойствами. Раздел 3.3 содержит модель разномодульных прослоек, по-разному сопротивляющихся растяжению и сжатию. Раздел 3.4 обобщает модель разномодульных прослоек. Повышение сопротивления сжатию происходит не мгновенно, а только при достижении определенного уровня деформации. Раздел 3.5 описывает модель прослоек, в которых с некоторой скоростью течет жидкость. Определяющие уравнения представляют собой модификацию

модели Био. Для численной реализации создан гибридный численный метод, совмещающий подходы С.К. Годунова и Г.В. Иванова. Раздел 3.6 представляет собой усовершенствование модели из раздела 3.5. Прослойки являются флюидонасыщенными, причем в пористом вязкоупругом скелете произведен учет эффекта схлопывания пор.

В четвертой главе представлен комплекс программ, реализующий модели и численные алгоритмы из главы 3. Раздел 4.1 описывает требования ко входным данным и принцип параллельной организации алгоритма. Раздел 4.2 дает оценку эффективности вычислений. Поскольку количество используемых процессов связано с размерами вычислительно области, в качестве оценки эффективности вычислений вычислялось отношение времени коммуникации к времени выполнения всей программы. Показано, что зависимость данного отношения от числа процессов близка к линейной. Раздел 4.3 демонстрирует результаты тестовых расчетов для двух задач. Показано изменение поведения распространения волн в зависимости от толщины и свойств прослоек. Продемонстрировано влияние эффекта схлопывания пор на формирование потоков жидкости в случае флюидонасыщенных прослоек.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработаны математические модели, описывающие распространение упругих волн в двумерной блочной среде, состоящей из блоков, разделенных податливыми прослойками. Свойства прослоек могут варьироваться. Рассмотрены упругие, вязкоупругие, разномодульные, пористые, флюидонасыщенные прослойки, а также флюидонасыщенные прослойки с пористым вязкоупругим скелетом.

2. Разработан численный метод, реализующий определяющие уравнения модели флюидонасыщенных прослоек с пористым вязкоупругим скелетом. Метод не обладает схемной диссипацией энергии.

3. Создан программный комплекс, позволяющий описывать процесс распространения волн в двумерной блочной среде. Комплекс позволяет производить расчеты для всех представленных в диссертации типов прослоек.

4. Показана достижимость характерной резонансной частоты вращательного движения блоков, зависящей исключительно от механических параметров модели.

Положения, выносимые на защиту, дают ясное представление о проведенном исследовании.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

– построены математические модели динамики сред, состоящих из упругих блоков и обладающих различными свойствами податливых прослоек;

- разработан численный метод, реализующий определяющие уравнения флюидонасыщенных прослоек с пористым вязкоупругим скелетом, не обладающий схемной диссипацией энергии;
- создан комплекс параллельных программ, который позволяет описывать распространение волн в неоднородных средах с блочной структурой;
- оценка практической достижимости характерной резонансной частоты может быть использована для анализа эффекта разрушения ледяного тороса;
- разработанные модели, методы решения, алгоритмы и программное обеспечение могут использоваться при математическом моделировании гидроразрыва нефтяного пласта.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечивается корректным применением апробированных теоретических положений, использованием проверенных численных математических методов и алгоритмов, подтверждается качественным согласием результатов расчета по методу и алгоритму, предложенным в докторской работе, с результатами расчетов других исследователей.

Оценка изложения материалов диссертации и автореферата. Материал, изложенный в диссертации, понятен, логичен, хорошо структурирован. Проведенные исследования можно считать завершенными. По теме докторской работы опубликовано 20 работ, в которых основные научные результаты диссертации изложены полностью. Из них 4 статьи – в рецензируемых журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

По содержанию диссертации и автореферату имеются следующие **замечания:**

1. На стр. 33 диссертации утверждается, что с помощью МКЭ невозможно моделировать отслоение и раскрытие трещин. Это не так. В современных пакетах конечноэлементного анализа при решении задач механики разрушения используется технология X-FEM (Extended Finite Element Method), позволяющая моделировать зарождение, развитие, распространение множества трещин в конструкциях, их влияние, взаимодействие, изменение траектории, ветвление и т.п. Имеется обширная литература по данному вопросу.

2. Во введении следовало упомянуть статью Г.В. Иванова, В.Д. Кургузова Безмоментная модель упругопластического деформирования и предельного состояния тонких прослоек (Прикладная механика и техническая физика, 1994, т. 35, № 6, с. 122-129), в которой рассматривались волны смещений и локализация деформаций при растяжении полосы из жестких блоков с упругопластическими прослойками.

3. Реологическая модель разномодульной (по разному сопротивляющейся растяжению-сжатию) прослойки (стр. 69) соответствует появлению излома на $\sigma - \varepsilon$ диаграмме деформирования материала при переходе через нуль, что противоречит опытным данным. Численный пример использования таких прослоек отсутствует. Было бы интересно посмотреть распространение волны изгиба в блочной среде с разномодульными прослойками, чтобы увидеть приводит ли учет разносопротивляемости к появлению каких-либо новых эффектов.

4. На титульной странице автореферата должно стоять Новосибирск – 2018, а не Красноярск – 2018, автореферат рассыпает диссовет, а не соискатель.

Отмеченные недостатки не снижают научную и практическую значимость проведённого исследования.

Оценивая работу в целом, следует отметить ее высокий научный уровень, строгую обоснованность решений при изложении их в тексте диссертации, актуальность и ценность результатов, как с теоретической, так и с практической точек зрения.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования и взаимосвязью выводов. Предложенные автором решения аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями.

Диссертация соответствует специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (по отраслям: физико-математические науки) и является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных лично автором исследований построены математические модели колебательных процессов в двумерных средах из упругих блоков, разделенных податливыми прослойками, создан комплекс параллельных программ для суперкомпьютеров кластерной архитектуры, реализующих разработанный численный алгоритм.

Диссертация соответствует требованиям пп. 9, 10 «Положения о присуждении ученых степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) в части, касающейся ученой степени кандидата наук, а ее автор, Ченцов Евгений Петрович, достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математические модели, численные методы и комплексы программ.

Оппонент согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и дальнейшую их обработку.

Ведущий научный сотрудник лаборатории механики разрушения материалов и конструкций Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, д.ф.-м.н. по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ



Кургузов Владимир Дмитриевич

09.01.2019

630090 Новосибирск, пр-т Лаврентьева, 15
ИГиЛ СО РАН
тел.: +7(383)333-17-46, 333-21-79
e-mail: kurguzov@hydro.nsc.ru

Подпись Кургузов В.Д. заверяю
Ученый секретарь ИГиЛ СО РАН
к.ф.-м.н.

Любашевская И.В.