

На правах рукописи

КВАСОВ Игорь Евгеньевич

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ
ПРОЦЕССОВ В ГЕТЕРОГЕННЫХ ТВЕРДЫХ
ДЕФОРМИРУЕМЫХ СРЕДАХ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

МОСКВА – 2011

Работа выполнена на кафедре информатики
Московского физико-технического института
(государственного университета)

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор
Петров Игорь Борисович

Официальные оппоненты:

член-корреспондент РАН, доктор физико-
математических наук, профессор
Холодов Александр Сергеевич

кандидат физико-математических наук, доцент
Клосс Юрий Юрьевич

Ведущая организация:

Институт вычислительной математики (ИВМ) РАН

Защита состоится «1» декабря 2011 г. в 9⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.156.05 при Московском физико-
техническом институте (государственном университете) по адресу:
141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9, ауд.
903 КПМ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МФТИ.

Автореферат разослан «20» октября 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

Федько О. С.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В современном мире с высокоразвитой энергоемкой индустрией задачи добычи энергоносителей (углеводородов) из земных недр имеют особый приоритет. Разумеется, эти проблемы являются многоотраслевыми, включающими такие аспекты, как:

- экспериментальное изучение распространения волн в существенно неоднородных (слоистых, градиентных, пористых, трещиноватых, флюидонасыщенных) породах;
- разработка технологий получения сейсмограмм как в твердых породах, так и шельфовых зонах;
- разработка технологий эксплуатации скважин; математическое моделирование;
- разработка математических методов решения обратных задач для выявления неоднородностей в породах;
- создание механико-математических моделей поведения углеводородсодержащих пород, описывающих их поведение в условиях различных динамических воздействий;
- реализация механико-математических моделей работы скважины, находящейся в породе;
- создание вычислительных методов для численного решения динамических многомерных систем уравнений механики сплошных сред (в первую очередь, систем уравнений упругости и гидродинамики); как известно, это уравнения в частных производных гиперболического типа;
- разработка вычислительных алгоритмов и расчетных программ для компьютеров;
- распараллеливание вычислительных алгоритмов для численного решения задач на высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных системах; к ним относятся задачи моделирования взрывных процессов в породах для инициирования сейсмических волн; распространения, отражения, переотражения, рассеивания, дифракции упругих волн, получения расчетных сейсмограмм; решение обратных задач;
- визуализация и интерпретация полученных результатов.

В диссертации решаются задачи сейсморазведки, которая представляет собой объединенный набор методов исследования геологического строения земной коры, базирующихся на исследовании распространения в ней упругих волн, возбуждаемых тем или иным, в первую очередь, искусственным путем.

В диссертации используется сеточно-характеристический численный метод, обладающий высоким порядком аппроксимации для повышения точности вычислений, но в то же время не являющийся осциллирующим. Подобные методы были успешно разработаны для одномерных задач и обобщены на двумерный случай (неструктурированные и регулярные четырехугольные сетки). Обобщение метода на нерегулярные сетки (как треугольные, так и тетраэдральные) представляет огромный интерес и является предметом диссертации.

При решении сложных пространственных задач с большим количеством неоднородностей остро встает вопрос скорости вычислений. Современные требования таковы, что исследование практически важных прикладных задач невозможно без использования параллельных вычислений на высокопроизводительных компьютерах. В диссертации также уделено внимание этому аспекту.

Цели работы

1. Исследование волнового отклика от субвертикальной макротрещины.
2. Исследование свойств трещиноватого пласта, построение осредненной модели.
3. Исследование многослойных геологических сред.
4. Исследование обратных задач сейсморазведки.
5. Исследование безопасности жилищных и промышленных сооружений.
6. Теоретическое обоснование условия линейного проскальзывания Шонберга, связывающего деформации и напряжения на трещине.

Научная новизна

1. Выполнена адаптация сеточно-характеристического метода на тетраэдральные сетки со вторым порядком аппроксимации.
2. Реализован комплекс программ для исследования динамических волновых задач в неоднородных телах, в том числе, в многослойных, перфорированных, кавернозных и трещиноватых средах как в одномер-

ном и двумерном случаях (на треугольных сетках), так и в трехмерном случае (на тетраэдральных и параллелепипедных сетках).

3. Проведено распараллеливание численного метода как на регулярных (параллелепипедных), так и нерегулярных (треугольных и тетраэдральных) сетках.

4. Выполнено теоретическое обоснование условия линейного проскальзывания Шонберга в случае нормального падения волны на трещину.

5. Проведено сравнение двумерных и трехмерных результатов моделирования трещиноватого пласта, что показало применимость двумерных расчетов в данной задаче, так как они дают не только качественно совпадающий с трехмерным расчетом результат, но и хороший количественный результат, отличающийся от результатов трехмерного моделирования не более чем на 30%.

6. Исследованы свойства отклика от макротрещины. Был сделан ряд практически важных для сейсморазведки выводов:

а. исследован характер отраженных и дифрагированных волн при различных параметрах макротрещины (наклон, протяженность, заполнение);

б. показана важность использования горизонтальной компоненты скорости на приемниках;

с. продемонстрирована возможность использования дуплексной волны при изучении макротрещин;

д. предложены способы определения наклона, протяженности и заполнения макротрещины.

7. Исследованы свойства трещиноватого пласта, в частности, получены зависимости отклика от плотности расположения трещин, от протяженности пласта, от количества трещин, от заполнения трещин, от расположения начального возмущения и его частоты. Для исследования отклика было введено понятие анизотропии отклика, показывающее степень асимметрии отраженного сигнала относительно вертикальной плоскости.

8. Построена осредненная модель трещиноватого пласта, как изотропная, так и анизотропная. Получены зависимости продольной и поперечной скорости звука от количества трещин в пласте.

9. Исследованы особенности распространения волн в многослойных геологических средах. Удалось идентифицировать все отраженные и

кратные волны при количестве слоев, равном 20, и избежать нефизических осцилляций (т.е. все полученные волны являются результатами отражений от границ слоев), что говорит о высокой точности метода.

10. Предложен метод определения механических характеристик нефтенасыщенного резервуара в двумерном случае на основе численного решения прямой и обратной задач сейсморазведки.

11. Исследовано воздействие волн, возникающих в результате землетрясения, на наземные конструкции: жилищные и промышленные сооружения. Задача решена, начиная с моделирования начального возмущения, возникающего в гипоцентре землетрясения, и заканчивая моделированием воздействия приходящих к поверхности волн, включая определение областей возможных разрушений.

Практическая ценность

Созданный комплекс программ, позволяющий проводить численное моделирование сложных пространственных задач сейсморазведки, дает возможность чаще обращаться к помощи численного моделирования, замещая дорогостоящий полевой эксперимент. В условиях истощения существующих месторождений нефти и газа поиск и сейсморазведка новых месторождений становятся особо актуальными. Численное моделирование волнового отклика, обусловленного отражением падающего фронта от кавернозных и трещиноватых зон в массивных породах, показало важность использования горизонтальной составляющей скорости на приемниках отраженного сигнала, возможность использования дуплексной волны при изучении макротрещин, позволило предложить способы определения наклона, протяженности и заполнения макротрещины. Использование численного моделирования существенно ускоряет процесс совершенствования интерпретации данных сейсморазведки, так как позволяет получать закономерности изменения волнового отклика существенно точнее, быстрее и дешевле по сравнению с привычным полевым экспериментом.

Другим важным практическим результатом является возможность определения областей разрушений наземных сооружений при воздействии на них волн, возникших в результате землетрясения, что имеет огромную ценность при проектировании зданий и предсказаний последствий землетрясений.

Работа поддержана рядом государственных и коммерческих грантов:

1. Программа (мероприятие): федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.2.1 «Проведение научных исследований научными группами под руководством докторов наук». Проект: «Разработка вычислительных технологий для моделирования пространственных динамических процессов в проблеме сейсморазведки на высокопроизводительных ЭВМ»;

2. Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)». НИР5. «Разработка физико-математических моделей, алгоритмов и эффективных методов решения задач механики сплошных сред на супер-ЭВМ», 2011-2012 гг.;

3. Грант РФФИ 11-01-12011-офи-м-2011. Разработка численных методов для решения задач геомеханики и сейсморазведки на многопроцессорных вычислительных системах, 2011-2012 гг.;

4. «Разработка технологии поиска трещино-кавернозных коллекторов сложнопостроенных залежей углеводородов с применением специализированного высокопроизводительного программно-технологического комплекса». RU.ЖШСИ. 00123-01 34 01-1. Проведение тестовых испытаний метода и программы, разработанных для суперкомпьютера SUNFire 15000, на синтетических данных, 2009-2011 гг.

5. Small or medium-scale focused research project (STREP) proposal ICT EU-Russia Coordinated Call. FP7-2011-EU-Russia, 2011-2012 у.

6. Грант РФФИ 0-01-92654-ИНД_а. Математическое моделирование сложных задач на высокопроизводительных вычислительных системах. 2010-2011 гг.

7. Договоры Шлюмберже-МФТИ № DPG.55229907.00397 и № DPG.55229907.00398. Наименование проектов: «Разработка численных алгоритмов для решения динамических задач теории упругости в трещиноватых геологических средах с использованием сеточно-характеристического метода и метода конечных элементов», «Разработка численных методов расчета волновых полей вблизи скважины».

Публикации

Научные результаты диссертации опубликованы в 38 работах, из которых 8 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ [10, 12, 13, 22, 33, 34, 35, 36].

Апробация

Результаты работы были доложены, обсуждены и получили одобрение специалистов на следующих научных конференциях:

1. Научные конференции Московского физико-технического института – Всероссийские молодёжные научные конференции с международным участием «Проблемы фундаментальных и прикладных, естественных и технических наук в современном информационном обществе» (МФТИ, Долгопрудный, 2006 – 2011);

2. XVIII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов – 2011» (МГУ, Москва, 2011);

3. Международная конференция «Численная геометрия, построение расчетных сеток и высокопроизводительные вычисления» (ВЦ РАН, Москва, 2010);

4. Indo-Russian workshop “High Performance Computing in Science and Technologies” (C-DAC, Pune, India, 2010);

5. XII и XIII международные семинары «Супервычисления и математическое моделирование» (РФЯЦ – ВНИИЭФ, Саров, 2010, 2011);

6. XVI международная научно-практическая конференция «Комплексная безопасность 2011 г.» (МЧС, Москва, 2011);

7. Российско-индийский семинар «Новые достижения математического моделирования» (ИАП РАН, Москва, 2011).

8. V Международная конференция «Математические идеи П.Л. Чебышева и их приложение к современным проблемам естествознания», (Обнинск, 2011).

Результаты работы были доложены, обсуждены и получили одобрение специалистов на научных семинарах в следующих организациях:

1. Югорский научно-исследовательский институт информационных технологий (Ханты-Мансийск, 2010);

2. Геологический факультет МГУ (Беломорская биологическая станция МГУ, Белое море, 2010);

3. ОАО «Центральная геологическая экспедиция» (Москва, 2008-2011);

4. Институт автоматизации проектирования РАН (Москва, 2009, 2011);

5. Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (федеральный центр) (Москва, 2011);

6. Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина (Москва, 2011);
7. Институт вычислительной математики РАН (Москва, 2011);
8. 7-я рамочная программа научных исследований и технологического развития Евросоюза, международный семинар «Европа-Россия» (Брюссель 2010, Роснаука 2011);
9. Геологический факультет МГУ (Москва, 2010);
10. ОАО «Лукойл» (Москва, 2011);
11. ОАО «Нефтяная компания «Роснефть»» (Москва, 2010, 2011);
12. Научно-образовательный центр «Нефтегазовый центр МГУ» (Москва, 2010);
13. ООО «Деко-геофизика» (Москва, 2010);
14. Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (Саров, 2011).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения и списка использованных источников. Общий объем диссертации составляет 270 страниц. Список использованных источников содержит ссылки на 177 публикаций.

Содержание работы

Введение

Во введении показывается актуальность использования численного моделирования в сейсморазведке, дается обзор методов численного моделирования прямых задач сейсморазведки, обосновывается выбор сеточно-характеристического численного метода решения задач сейсморазведки.

Глава 1

Для описания геологических пород в диссертации используется модель линейно упругого твердого тела. В данной главе формулируется система дифференциальных уравнений в частных производных механики деформируемого твердого тела:

$$\begin{cases} \rho \dot{\vec{v}} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \\ \dot{\boldsymbol{\sigma}} = \lambda (\nabla \cdot \vec{v}) \mathbf{I} + \mu (\nabla \otimes \vec{v} + (\nabla \otimes v)^T) \end{cases}$$

Здесь ρ и λ , μ – константы упругого материала: плотность и параметры Ляме соответственно. Переменными являются \vec{v} – скорость дви-

жения среды в данной точке, и $\boldsymbol{\sigma}$ – симметричный тензор напряжений Коши. ∇ – оператор градиента, \mathbf{I} – единичный тензор, $(\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma})_k = \sum_i \nabla_i \sigma_{ki}$, \otimes – оператор тензорного произведения: $(\vec{a} \otimes \vec{b})_{ij} = a_i b_j$.

Для удобства построения численного метода система записывается в следующем виде:

$$\dot{\vec{u}} + \sum_j \left(\mathbf{A}_j \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial \xi_j} \right) = 0,$$

где \mathbf{A}_j – квадратные матрицы с постоянными коэффициентами, а в вектор \vec{u} собраны переменные системы:

$$\vec{u} = \{\vec{v}, \boldsymbol{\sigma}\}^T = \{v^1, v^2, v^3, \sigma^{11}, \sigma^{22}, \sigma^{33}, \sigma^{23}, \sigma^{13}, \sigma^{12}\}^T.$$

Для каждой матрицы \mathbf{A} существует разложение:

$$\mathbf{\Omega A} = \mathbf{A \Omega},$$

где $\mathbf{\Lambda}$ – диагональная матрица собственных значений \mathbf{A} , $\mathbf{\Omega}$ – матрица собственных векторов \mathbf{A} . Далее проводится спектральное исследование матриц, целью которого является аналитическое представление этого разложения. Полученное разложение используется для вывода явных формул расчета узлов сетки следующего временного слоя (как внутренних, так и граничных) сеточно-характеристическим методом.

Глава 2

В данной главе формулируется алгоритм расчета узлов нерегулярной сетки следующего временного слоя сеточно-характеристическим методом.

На каждом шаге по времени случайным образом выбираются ортогональные направления расщепления $(\vec{\xi}_1, \vec{\xi}_2, \vec{\xi}_3)$. В этом базисе определяется вид исходной системы уравнений. Далее последовательно рассматриваются три системы вида $\dot{\vec{u}} + \mathbf{A}_i \frac{\partial \vec{u}}{\partial \xi_i} = 0$. После замены переменных $\vec{v} = \mathbf{\Omega} \vec{u}$ необходимо лишь решить ряд независимых уравнений переноса $\dot{v}_j + \lambda_j \frac{\partial v_j}{\partial \xi_i} = 0$:

$$v_j(\vec{r}_k, t^{n+1}) = v_j(\vec{r}_k - \lambda_j \tau \vec{\xi}_i, t^n).$$

Здесь в правой части равенства стоит восстановленное с помощью интерполяции в треугольнике значение с предыдущего временного слоя в точке пересечения его характеристикой уравнения, проходящей через (\vec{r}_k, t^{n+1}) .

Далее описывается параллельная реализация сеточно-характеристического метода с использованием технологий Open MP и MPI.

Реализация с помощью Open MP заключается в распараллеливании основного цикла пересчета узлов следующего временного слоя. Пересылка данных не требуется, так как используется механизм общей памяти. Несмотря на свою простоту, распараллеливание с помощью Open MP эффективно. Так, с использованием четырехъядерного процессора эффективность составляет около 85%.

Реализация с помощью MPI существенно сложнее, однако позволяет добиться эффективного использования большего количества процессоров. Вся область интегрирования разбивается на количество частей (доменов), равных количеству процессоров. Внутренние узлы каждого домена могут быть обчислены без обмена данными с другими процессорами, так как для расчета значения функции на следующем временном слое в некотором узле сетки требуется знать значение функции лишь в соседних с данным узлах сетки текущего временного слоя. Для облегчения обсчета граничных узлов домена хранится еще один слой узлов сетки, который не обчисляется, а лишь используется для обмена данными с соседними доменами. Использование MPI позволяет запускать вычислительную программу на кластере с 64 процессорами, достигая эффективности в 80%.

Глава 3

Для математического моделирования сейсмических откликов от трещиноватых углеводородсодержащих геологических пород в сейсмологии традиционно используют осредненные модели или модели с эффективными коэффициентами среды, что влечет за собой необходимость введения некоторых эмпирических коэффициентов (например, коэффициенты податливости породы), дополнительных гипотез (например, гипотеза линейного проскальзывания). В данной главе исследуется возможность аналитического решения задачи распространения волновых полей в породах с трещинами на основании системы уравнений механики деформируемого твердого тела без введения каких-либо эмпи-

рических параметров. В случае нормального падения волнового фронта на флюидонасыщенную трещину (что эффективно делает задачу одномерной) удастся доказать справедливость условия линейного проскальзывания Шонберга, а также получить аналитическое выражение для коэффициента податливости породы.

В одномерном случае система уравнений линейной упругости записывается следующим образом:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial s}{\partial x}$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial v}{\partial x}$$

Пусть левая граница трещины имеет координату 0 , а правая граница – координату d . Введем понятие смещения точки как интеграл от скорости этой точки по времени:

$$\varepsilon(x, t) = \int_0^t v(x, \tau) d\tau.$$

Назовем раскрытием трещины величину

$$\Delta(t) = \varepsilon(d, t) - \varepsilon(0, t).$$

Определим среднее значение напряжения s на трещине как

$$s^*(t) = \frac{1}{d} \int_0^d s(x, t) dx.$$

Далее доказывается следующее соотношение:

$$s^*(T) = \frac{\rho c^2}{d} \Delta(T).$$

Таким образом, среднее напряжение на трещине прямо пропорционально раскрытию трещины. Коэффициент пропорциональности называется податливостью трещины:

$$K = \frac{\rho c^2}{d}.$$

Глава 4

Исследуются свойства макротрещин – нарушениях сплошности породы без существенного смещения стенок относительно длинной оси. Их роль в фильтрационных свойствах продуктивных резервуаров весьма

значительна, что определяет важность оценки их пространственного положения и характеристик. Решаются следующие задачи:

1. Выяснение состава и особенностей волн, формирующих сейсмический отклик от субвертикальной макротрещины при регистрации на дневной поверхности продольных и обменных волн.

2. Оценка влияния на характер волнового отклика параметров субвертикальных макротрещин и свойств вмещающих пород.

Также получаются и исследуются так называемые дуплексные волны, возникающие в результате двух отражений падающего фронта: от нижележащей границы и далее от макротрещины (рис. 1).

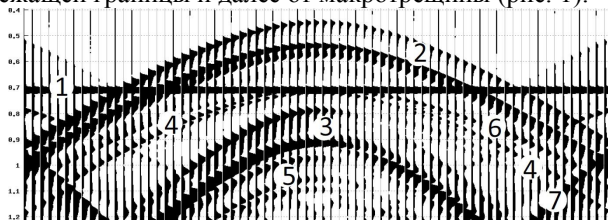


Рис. 1.

На рисунке показано проявление дуплексного отражения от макротрещины при возбуждении типа плоский фронт (в модульном представлении). 1 – отраженный фронт; 2 – дифрагированная продольная волна (Дпр); 3 – дифрагированная обменная волна (Дрс); 4 – дифрагированная продольная волна, связанная с прохождением отраженного фронта (Дпр*); 5 – дифрагированная обменная волна, связанная с прохождением отраженного фронта (Дрс*); 6 – дуплексное отражение (PPP); 7 – паразитная волна от боковой границы.

По результатам исследования делается ряд практически важных для сейсморазведки выводов о свойствах отраженных, дифрагированных и дуплексных волн, а также о применимости тех или иных методик их исследования.

Глава 5

В этой главе исследуются свойства трещиноватого пласта – серии субвертикальных макротрещин. Источником начального возмущения служит приповерхностный взрыв. Анализируется поток энергии $\mathbf{j} = -\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{v}$ через верхнюю половину окружности радиуса $R = 1,5 \text{ км}$, описанной около центра трещиноватого пласта, находящегося на глубине $H = 2 \text{ км}$.

Для характеристики несимметричности отклика было введено понятие *анизотропии* отклика:

$$\alpha = \frac{E_L - E_R}{E_L + E_R},$$

где α – анизотропия отклика, E_L – энергия левой части отклика, E_R – энергия правой части отклика.

По результатам исследования были сделаны следующие выводы:

1. При неизменном количестве трещин при увеличении отношения расстояния между трещинами к длине одной трещины от 0.5 до 4.0, начиная с некоторой плотности расположения трещин (соответствующий отношению 3.0), величина отраженной энергии перестает меняться, а анизотропия отклика выходит на устойчивый уровень. Это объясняется тем, что начиная с этого расстояния между трещинами волновые процессы внутри трещиноватого пласта практически полностью отсутствуют, все трещины «работают» независимо.

2. При неизменной протяженности пласта и при увеличении количества трещин от 3 до 21 наблюдается возрастание энергии отклика при увеличении плотности расположения трещин, связанное с тем, что из-за небольшого угла между направлением распространения импульса и ориентацией трещин пласт трещин фактически прозрачен для падающей волны: трещины не перекрывают весь пласт полностью, а с увеличением плотности расположения трещин возрастает степень «непрозрачности» пласта, что приводит к большему отражению сигнала.

3. При изменении частоты падающего сигнала изменения анизотропии отклика практически не происходит.

Также в этой главе исследуется возможность построения осредненной модели трещиноватого пласта. Трещиноватый пласт заменяется прямоугольником однородной среды, и методами глобальной оптимизации подбираются такие параметры этой среды, что отклик на поверхности земли от трещиноватого пласта и от осредненного прямоугольника оказываются максимально близкими. Исследуются зависимости параметров осредненной модели (продольная и поперечная скорости звука в осредненном прямоугольнике) от высоты пласта и угла падения плоского фронта.

Наконец, проводится сравнение 2D и 3D расчетов (геометрия области, начальные условия и другие параметры задачи совпадают). Дан-

ное сравнение показывает, что расхождение полученных результатов составляет не более 30%. Таким образом, двумерный расчет дает не только качественно верный результат, но и хорошие количественные оценки. Следовательно, при исследовании трехмерных динамических процессов в геологических средах вполне можно использовать двумерные расчеты. Это позволяет существенно ускорить время расчета и уменьшить затраты на хранение и обработку данных.

Глава 6

Исследуются многослойные геологические среды, состоящие из большого количества слоев с различными упругими характеристиками. При определенных параметрах слоев в двухслойной среде (скорость звука в верхнем слое больше скорости звука в нижнем слое) удастся получить эффект «головной волны», по форме напоминающей конус Маха (рис. 2, слева). В двухпериодическом композите были получены вихревые волны (рис. 2, справа).

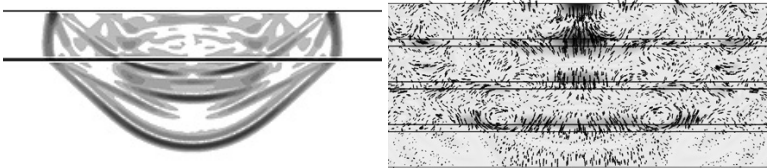


Рис. 2. Головная волна (слева), вихревые волны (справа).

Исследуются многослойные геологические среды, соответствующие реальным нефтяным месторождениям, с числом слоев до 20. При этом на сейсмограмме, регистрируемой на приемнике, расположенном у поверхности земли, удастся выделить отраженные волны от каждой границы раздела сред и показать отсутствие паразитных волн, что говорит о высокой точности используемого метода.

Глава 7

В данной главе изучается обратная задача численного моделирования: требуется определить положение неоднородностей (трещин) в земной коре. Рассматривается упрощенный вариант данной задачи: имеется заполненная жидкостью заданной протяженности, расположенная во вмещающем массиве с известными упругими характеристиками. Тогда вектор \mathbf{z} неизвестных параметров, определяющий геометрию области, содержит лишь две компоненты: глубина залегания трещины h , $h_1 \leq h \leq h_2$, и угол ее наклона α , $\alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2$.

Одной из особенностей данной задачи является то, что информацию можно получать лишь из экспериментальных измерений, для получения которых используется акустическое зондирование. На поверхности земли в точках x_i располагается серия сейсмоприёмников, на которых в моменты времени t_j фиксируются вертикальные компоненты скорости частиц $\tilde{V}_y(x_i, t_j)$ в отраженной волне. Ищется такое значение \mathbf{z} , чтобы численно моделируемый отклик $V_y(\mathbf{z}, x_i, t_j)$ наименьшим образом отличался от экспериментального.

Таким образом, рассматриваемая задача формулируется как оптимизационная задача наименьших квадратов:

$$\min I(\mathbf{z}), \quad \mathbf{z} \in D = [h_1; h_2] \times [\alpha_1; \alpha_2],$$

$$I(\mathbf{z}) = \sum_i \sum_j [V_y(\mathbf{z}, x_i, t_j) - \tilde{V}_y(x_i, t_j)]^2.$$

Функция $I(\mathbf{z})$ не имеет аналитического представления, и получение ее значений связано с проведением трудоемких численных экспериментов. Для решения задачи применяется ряд быстрых методов глобальной оптимизации, разработанных для подобного класса сложных многоэкстремальных задач.

Глава 8

В этой главе проводится исследование распространения упругих волн в жилищных конструкциях, моделируемых кубической областью с равномерной периодической структурой кубических полостей. В центре одной из боковых граней происходит взрыв. Изучается прохождение упругой волны через здание, в частности, подробно рассматриваются эффекты, возникающие при достижении упругой волной противоположной грани (эффект тыльного откола).

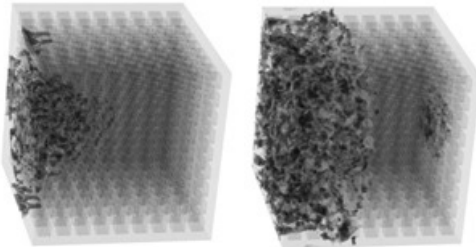


Рис. 3. Эффект тыльного откола.

В данной главе также исследуется процесс распространения упругих волн, возникающих в процессе землетрясения, в гетерогенных средах. Проводится анализ влияния упругих волн на прочность наземных сооружений. Задача решается с момента возникновения начального возмущения в гипоцентре землетрясения до момента прохождения всех образующихся в результате землетрясения волн через здание. На основе критерия Мизеса определяются области разрушения здания.

Заключение

В заключении подробно изложены основные результаты и выводы диссертации.

Основные результаты и выводы диссертации

1. Выполнена адаптация сеточно-характеристического метода на случай тетраэдральных сеток.

2. Создан комплекс программ для решения ряда задач механики деформируемого твердого тела. Комплекс программ включает в себя: а). программу для задания входных данных (геометрия расчетной области, граничные и контактные условия, начальные условия, формат выходных данных); б). собственно вычислительные программы – одномерные, двумерные (на треугольных сетках), трехмерные (на тетраэдральных и параллелепипедных сетках); в). программу визуализации волновых полей; г). программу построения сейсмограмм.

3. Выполнено распараллеливание вычислительных программ с помощью технологий Open MP и MPI. Выполнена оптимизация вычислительных программ с помощью методов агрессивной оптимизации, позволяющая добиться высокой скорости счета даже на одном процессоре.

4. Решен ряд практически важных задач сейсморазведки: а). выполнено теоретическое обоснование условия линейного проскальзывания Шонберга в случае нормального падения волны на трещину; б). исследованы свойства отклика от макротрещины; в). исследованы свойства трещиноватого пласта, показана применимость двумерных расчетов в данной задаче, построена усредненная модель трещиноватого пласта; г). исследованы особенности распространения волн в много-слойных геологических средах.

5. Предложен метод определения механических характеристик нефтенасыщенного резервуара в двумерном случае на основе численного решения прямой и обратной задач сейсморазведки.

6. Исследовано воздействие волн, возникающих в результате землетрясения, на наземные конструкции.

Список публикаций соискателя по теме диссертации

1. *Квасов И.Е., Петров И.Б.* Численное исследование волновых процессов в перфорированных деформируемых средах. // Труды 49 научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть VII. Управление и прикладная математика. М.: «Солар», 2007. С. 69 – 70.

2. *Квасов И.Е., Петров И.Б., Челноков Ф.Б.* Расчет волновых процессов в неоднородных пространственных конструкциях. // Сборник научных трудов «Моделирование процессов обработки информации». М.: МФТИ, 2007. С. 4 – 15.

3. *Квасов И.Е.* Расчет волновых процессов в неоднородных пространственных конструкциях. // Труды 50-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть VII. Управление и прикладная математика. Том 1. М.: МФТИ, 2007. С. 50 – 51.

4. *Самоваров О.И., Николаев А.В., Гетьман А.О., Квасов И.Е.* Технология использования вычислительной кластерной системы МФТИ-60 для численного моделирования. – М.: МФТИ, 2007. 45 с.

5. *Квасов И.Е., Петров И.Б.* Численное исследование пространственных волновых процессов с использованием неструктурированных сеток. // Сборник научных трудов «Моделирование и обработка информации». М.: МФТИ, 2008. С. 15 – 18.

6. *Квасов И.Е.* Численное исследование волновых процессов в задаче приповерхностного взрыва. // Труды 51-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть VII. Управление и прикладная математика. М.: МФТИ, 2008. С. 23 – 26.

7. *Кожевников К.О., Квасов И.Е., Петров И.Б.* Численное исследование пространственных волновых процессов с использованием кубических сеток в кластерных средах на многопроцессорных машинах. // Сборник научных трудов «Модели и методы обработки информации». М.: МФТИ, 2009. С. 32 – 35.

8. *Агаханов С.Н., Квасов И.Е.* Численное исследование волновых процессов с использованием неструктурированных сеток. // Сборник

научных трудов «Модели и методы обработки информации». М.: МФТИ, 2009. С. 36 – 39.

9. *Панкратов С.А., Квасов И.Е., Петров И.Б.* Численное моделирование многослойных пород в задачах геофизики. // Сборник научных трудов «Модели и методы обработки информации». М.: МФТИ, 2009. С. 40 – 44.

10. *Квасов И.Е., Петров И.Б., Челноков Ф.Б.* Расчет волновых процессов в неоднородных пространственных конструкциях. // Математическое моделирование, 2009, т. 21, № 5, с. 3 – 9.

11. *Квасов И.Е.* Численное исследование динамических процессов в геологических средах с коридорами и кластерами трещин сеточно-характеристическим методом. // Труды 52-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть VII. Управление и прикладная математика. Том 3. М.: МФТИ, 2009. С. 21 – 24.

12. *Квасов И.Е., Панкратов С.А., Петров И.Б.* Численное моделирование сейсмических откликов в многослойных геологических средах сеточно-характеристическим методом. // Математическое моделирование, 2010, т. 22, № 9, с. 13 – 22.

13. *Квасов И.Е., Панкратов С.А., Петров И.Б.* Численное исследование динамических процессов в сплошной среде с трещиной, инициируемых приповерхностным возмущением, сеточно-характеристическим методом. // Математическое моделирование, 2010, т. 22, № 11, с. 109 – 122.

14. *Кожевников К.О., Квасов И.Е., Петров И.Б.* Расчет пространственных динамических процессов в трещиноватых геологических средах. // Сборник научных трудов «Информационные технологии: модели и методы». М.: МФТИ, 2010. С. 45 – 51.

15. *Агаханов С.Н., Квасов И.Е., Панкратов С.А.* Численное исследование осредненных моделей неоднородных сред в задачах геофизики сеточно-характеристическим методом. // Сборник научных трудов «Информационные технологии: модели и методы». М.: МФТИ, 2010. С. 12 – 21.

16. *Агаханов С.Н., Квасов И.Е.* Численное построение осредненной модели трещиноватого пласта в геологической среде. // Труды 53-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных

и прикладных наук»: Часть VII. Управление и прикладная математика. Том 2. М.: МФТИ, 2010. С. 4 – 7.

17. *Голубев В.И., Квасов Д.Е., Квасов И.Е.* Определение положения сейсмогеологических трещин при помощи численных методов глобальной оптимизации. // Труды 53-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть VII. Управление и прикладная математика. Том 2. М.: МФТИ, 2010. С. 20 – 22.

18. *Голубев В.И., Квасов И.Е.* Численное моделирование землетрясений в различных геологических породах. // Труды 53-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть VII. Управление и прикладная математика. Том 2. М.: МФТИ, 2010. С. 22 – 23.

19. *Квасов И.Е.* Численное исследование анизотропии отклика приповерхностного возмущения от трещиноватого пласта. // Труды 53-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть VII. Управление и прикладная математика. Том 2. М.: МФТИ, 2010. С. 28 – 30.

20. *Квасов И.Е.* Аналитическое обоснование условия линейного проскальзывания на трещине. // Труды 53-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть VII. Управление и прикладная математика. Том 2. М.: МФТИ, 2010. С. 30 – 31.

21. *Квасов И.Е., Санников А.В., Фаворская А.В.* Численное моделирование пространственных динамических процессов сеточно-характеристическим методом на неструктурированных тетраэдральных сетках. // Труды 53-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: Часть VII. Управление и прикладная математика. Том 2. М.: МФТИ, 2010. С. 32 – 36.

22. *Квасов И. Е., Петров И. Б., Санников А. В., Фаворская А. В.* Компьютерное моделирование пространственных динамических процессов сеточно-характеристическим методом на неструктурированных тетраэдральных сетках. // Информационные технологии. 2011. №9. С. 28 – 30.

23. *Квасов И.Е.* Численное моделирование волнового отклика от субвертикальных макротрещин. // Ломоносов – 2011: XVIII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых; секция «Вычислительная математика и кибернетика»: Москва, МГУ

имени М.В. Ломоносова, 11–15 апреля 2011 г.: Сб. тезисов. Сост. Позднеев А.В., Суворов М.В., Шевцова И.Г. М.: Издательский отдел факультета ВМиК МГУ; МАКС Пресс, 2011. С. 125 – 126.

24. *Квасов И. Е., Санников А. В., Фаворская А. В.* Сеточно-характеристический метод на неструктурированных тетраэдральных сетках для решения задач сейсморазведки и сейсмологии. // М.:МФТИ, Сб. трудов МФТИ: Математические модели и задачи управления. 2011. С. 80 – 86.

25. *Голубев В.И., Квасов И. Е., Петров И.Б.* Численное моделирование упругих волн, распространяющихся из гипоцентра землетрясения, и их воздействие на промышленные и жилые сооружения // М.:МФТИ, Сб. трудов МФТИ: Математические модели и задачи управления. 2011. С. 87 – 93.

26. *Агаханов С.Н., Квасов И. Е.* Построение однородной модели коридора трещин с использованием неструктурированных сеток. // М.:МФТИ, Сб. трудов МФТИ: Математические модели и задачи управления. 2011. С. 94 – 99.

27. *Kvasov I.E., Pankratov S.A., Petrov I.B.* Numerical study of dynamic processes in a continuous medium with a crack initiated by a near-surface disturbance by means of the grid-characteristic method. // *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2011, Vol. 3, N. 3, pp. 399 – 409.

28. *Kvasov I.E., Pankratov S.A., Petrov I.B.* Numerical simulation of seismic responses in multilayer geologic media by the grid-characteristic method. // *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2011, Vol. 3, N. 2, pp. 196 – 204.

29. *Квасов И.Е.* Численное исследование волновых процессов в геологических средах в задачах сейсморазведки. // V Международная конференция «Математические идеи П.Л. Чебышева и их приложение к современным проблемам естествознания», Обнинск, 14-18 мая 2011г.: Сб. тезисов. С. 117 – 118.

30. *Квасов И.Е., Санников А.В., Фаворская А.В.* Численное моделирование пространственных динамических процессов сеточно-характеристическим методом на неструктурированных тетраэдральных сетках. // V Международная конференция «Математические идеи П.Л. Чебышева и их приложение к современным проблемам естествознания», Обнинск, 14-18 мая 2011г.: Сб. Тезисов. С. 118 – 119.

31. Голубев В.И., Квасов И.Е., Хохлов Н.И., Петров И.Б. Численное моделирование сейсмостойкости жилых и промышленных наземных сооружений. // Сборник материалов XVI международной научно-практической конференции «Комплексная безопасность 2011 г.». ФГУ ВНИИ МЧС, 2011. С. 55 – 61.

32. Голубев В.И., Квасов И.Е., Хохлов Н.И., Петров И.Б. Численное моделирование волн Рэлея и Лява сеточно-характеристическим методом. // Сборник материалов XVI международной научно-практической конференции «Комплексная безопасность 2011 г.». ФГУ ВНИИ МЧС, 2011. С. 62 – 68.

33. Голубев В.И., Квасов И.Е., Петров И.Б. Воздействие природных катастроф на наземные сооружения. // Математическое моделирование, 2011, т. 23, № 8, с. 46 – 54.

34. Квасов И.Е., Петров И.Б. Численное исследование анизотропии волновых откликов от трещиноватого пласта сеточно-характеристическим методом. // Математическое моделирование, 2011, т. 23, № 10, с. 97 – 106.

35. Квасов И.Е., Петров И.Б. Численное моделирование волновых процессов в геологических средах в задачах сейсморазведки с помощью высокопроизводительных ЭВМ. // Журнал вычислительной математики и математической физики, 2012, т. 52, № 2, с. 17 – 34.

36. Левянт В.Б., Петров И.Б., Квасов И.Б. Численное моделирование волнового отклика от субвертикальных макротрещин, вероятных флюидопроводящих каналов. // Технологии сейсморазведки, 2011, № 4, с. 4 – 29.

37. Голубев В.И., Квасов И.Е., Петров И.Б. Численное моделирование волновых процессов в гетерогенных средах. // Супервычисления и математическое моделирование. Труды XII международного семинара / Под ред. Р. М. Шагалиева. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. С. 110 – 115.

38. Голубев В.И., Квасов И.Е., Петров И.Б., Хохлов Н.И. Распространение сейсмических волн в гетерогенных геологических средах и задачи сейсмостойкости зданий и сооружений. // XIII международный семинар «Супервычисления и математическое моделирование». Тезисы. – Саров: ФГУП «ВНЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. С. 59 – 60.

Личный вклад соискателя в работах с соавторами

1. Выполнена адаптация сеточно-характеристического метода на тетраэдральные сетки со вторым порядком аппроксимации.
2. Реализован комплекс программ для исследования динамических волновых задач в неоднородных телах как в одномерном и двумерном случаях (на треугольных сетках), так и в трехмерном случае (на тетраэдральных и параллелепипедных сетках).
3. Проведено распараллеливание численного метода как на регулярных (параллелепипедных), так и нерегулярных (треугольных и тетраэдральных) сетках.
4. Выполнена оптимизация вычислительного ядра программы, позволившая добиться высокой скорости счета даже на одном процессоре.
5. Выполнено теоретическое обоснование условия линейного проскальзывания Шонберга в случае нормального падения волны на трещину.
6. Проведено сравнение двумерных и трехмерных результатов моделирования трещиноватого пласта, что показало применимость двумерных расчетов в данной задаче.
7. Исследованы свойства отклика от макротрещины.
8. Исследованы свойства трещиноватого пласта.
9. Построена осредненная модель трещиноватого пласта, как изотропная, так и анизотропная.
10. Исследованы особенности распространения волн в многослойных геологических средах.
11. Предложен метод определения механических характеристик нефтенасыщенного резервуара в двумерном случае на основе численного решения прямой и обратной задач сейсморазведки.
12. Исследовано воздействие волн, возникающих в результате землетрясения, на наземные конструкции.

Квасов Игорь Евгеньевич

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В
ГЕТЕРОГЕННЫХ ТВЕРДЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СРЕДАХ

Автореферат

Подписано в печать 10.10.2011. Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 70 экз. Заказ № 634.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Московский физико-технический
институт (государственный университет)»

Отдел оперативной полиграфии «Физтех-полиграф»
141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9