

На правах рукописи

ПАНКРАТОВ Сергей Александрович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ
ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗАДАЧАХ
СЕЙСМОРАЗВЕДКИ**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук

МОСКВА – 2012

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

Научный руководитель: член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук,
профессор Петров Игорь Борисович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Дикусар Василий Васильевич,
Вычислительный центр
им. А. А. Дородницына РАН, ведущий
научный сотрудник

кандидат физико-математических наук
Осипов Сергей Владимирович,
ОАО «НК «Роснефть», главный
специалист департамента научно-
технического развития и инноваций

Ведущая организация: Институт автоматизации проектирования
РАН

Защита состоится __ декабря 2012 г. в __ 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 КПП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МФТИ.

Автореферат разослан __ ноября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Федько О. С.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Проблема сейсморазведки углеводородов является одной из наиболее актуальных. В последние годы все чаще возникает вопрос удешевления полевых экспериментов практической геологии. Новые месторождения, как правило, находятся в труднодоступных и слабоосвоенных территориях. Это увеличивает значение численного моделирования для первичной оценки при исследовании природных залежей. При этом актуальным является решение следующих задач:

- численное моделирование распространения сейсмических волн в геологических средах различной сложности;
- реализация и тестирование новых численных алгоритмов и комплексов программ;
- реализация вычислительных методов для численного решения систем уравнений в частных производных гиперболического типа, которые описывают состояние деформируемого твердого тела;
- анализ численных сейсмограмм и сравнение их с результатами полевых испытаний;
- разработка методик и технологий, обеспечивающих изучение геосреды, осложненной трещиноватостью и другими неоднородностями;
- разработка методов решения обратных задач для выявления неоднородностей в породах;
- создание механико-математических моделей углеводородсодержащих пород, описывающих их поведение в условиях различных динамических воздействий;

- реализация механико-математических моделей резервуаров и областей кавернозности в геологических средах;
- создание универсальных программных комплексов, позволяющих проводить численные эксперименты для задач сложной конфигурации и получать результаты для анализа и сравнения с полевыми испытаниями;
- анализ полученных результатов и выявление закономерностей.

В диссертации моделируются и исследуются задачи сейсморазведки. Предметом исследования является распространение упругих волн и их взаимодействие с неоднородностями в породе. Каждая задача имеет строгое описание области интегрирования, границ области интегрирования и начальных условий.

В диссертации используется двухслойный гибридный сеточно-характеристический численный метод. Для повышения порядка аппроксимации предложена трехслойная схема. Успешно разработаны методы для одномерных задач и обобщены на двумерный случай (неструктурированные треугольные и регулярные четырехугольные сетки). Обобщение метода и использование трехслойной компактной схемы представляет значительный интерес и является одним из результатов диссертации.

Часть исследования посвящена оптимизации программного кода с учетом свойств решаемой системы уравнений.

Цели работы

1. Расчет волнового отклика от различных газо- и флюидонасыщенных трещин.
2. Численное исследование поведения различных моделей неоднородностей в геологических средах. Сравнение и верификация осредненных моделей.
3. Расчет энергий отклика от кластера с различным набором неоднородностей.

4. Реализация и проверка компактной схемы повышенного порядка аппроксимации.

Научная новизна

1. Разработана и реализована разностная схема на трехслойном шаблоне на прямоугольных сетка с третьим порядком аппроксимации.
2. Существенно улучшен комплекс программ (на треугольных и прямоугольных сетках) для моделирования задач современной сейсморазведки для исследования волновых процессов в упругих телах, содержащих несколько трещин, кластеры или резервуары с жидкостью.
3. Выполнено детальное исследование осредненных моделей для неоднородностей Шоенберга, Хадсона и Феллера.
4. Проведено сравнение численного решения полученного с помощью разностной схемы на трехслойном шаблоне (повышенного порядка аппроксимации) с численным решением, полученным с помощью схем первого и второго порядка, а также гибридной схемы.
5. Проведено численное моделирование волнового отклика от мегатрещины и исследованы его свойства. Были сформулированы важные практические выводы:
 - a. на характер отраженных и дифрагированных волн существенно влияют различные параметры мегатрещины (внутренняя структура, протяженность, заполнение);
 - b. при исследовании флюидонасыщенных мегатрещин важно использовать горизонтальную компоненту скорости на приемниках – это позволяет выявить мегатрещину;
 - c. в результате численного моделирования изучено появление дуплексной волны при отражении от мегатрещины;

- d. выявлены основные характеристики волнового отклика, по которым есть возможность определить параметры мегатрещины.
6. Исследованы зависимости волновых откликов от характеристик трещиноватых кластеров; выявлены качественные и количественные особенности энергии отклика от таких сред.
7. В программном коде реализованы осредненные модели Шоенберга, Хадсона, Феллера.
8. Предложен метод определения основных параметров трещиноватого кластера с помощью расчетов его энергетических характеристик волнового отклика.

Практическая ценность

Реализованный программный код позволяет производить численное моделирование геологических сред различной сложности, используя гибкую конфигурацию, как области интегрирования, так и численных методов решения. Поиск новых месторождений углеводородов в современных условиях становится все более и более актуальным. Важнейшую роль здесь играет как определение местоположения новых залежей, так и оценка их емкости. Стоимость полевых работ предъявляет особые требования к подготовке и анализу результатов численного моделирования на начальных этапах проекта по оценке новых месторождений. Использование численного эксперимента позволяет существенно снизить стоимость проведения как полевых работ, так и интерпретацию их результатов.

Работа поддержана рядом государственных и коммерческих грантов:

1. Грант РФФИ 11-01-12011-офи-м-2011. Разработка численных методов для решения задач геомеханики и сейсморазведки на многопроцессорных вычислительных системах, 2011-2012 гг.;
2. Грант РФФИ 0-01-92654-ИНД_а. Математическое моделирование сложных задач на высокопроизводительных вычислительных системах. 2010-2011 гг.
3. 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 сеточнохарактеристического метода и метода конечных элементов», «Разработка численных методов расчета волновых полей вблизи скважины».

Публикации

Научные результаты диссертации опубликованы в 12 работах, из которых 2 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ [2, 3]

Апробация

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

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, 2007 – 2011);
2. Расширенный семинар «Вычислительная физика: алгоритмы, методы и результаты». Институт космических исследований РАН совместно с Институтом теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН. (г. Таруса, 2011);
3. Научные семинары ОАО «Центральная геологическая экспедиция. (Москва, 2009-2012);
4. Научный семинар ОАО «Нефтяная компания «Роснефть»» (Москва, 2010);
5. Научные семинары компании «Шлюмберже» (Москва, 2009-2010).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка использованных источников. Общий объем диссертации составляет 140 страниц. Список использованных источников содержит ссылки на 114 публикаций.

Содержание

Введение

Во введение рассмотрены актуальные задачи сейсморазведки и современные подходы к их моделированию. Дан обзор численных методов, применяемых для моделирования динамических процессов в упругих средах, и рассмотрена их применимость к моделированию геологических сред. Разобраны различные разностные схемы решения систем гиперболических уравнений и обосновано применение сеточно-характеристического метода для решения задач сейсморазведки.

Глава 1

Для математического моделирования волновых процессов в деформируемом твердом теле использовалась система динамических уравнений, объединяющая уравнения движения и реологические соотношения. В данной главе эта система уравнений формулируется в следующем виде:

$$\begin{aligned}\rho \cdot \dot{v}_i &= \nabla_j \cdot \sigma_{ij}, \\ \dot{\sigma}_{ij} &= q_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} + F_{ij}.\end{aligned}$$

Здесь ρ – плотность среды, \dot{v}_i – компоненты скорости смещения, $\dot{\sigma}_{ij}$ и ε_{kl} – компоненты тензоров напряжения и деформаций, ∇_j – ковариантная производная по j -й координате, F_{ij} – добавочная правая часть.

Тензор скорости деформации $e_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}$ имеет вид:

$$\frac{1}{2} \nabla_i v_j + \nabla_j v_i$$

Запись всех последующих уравнений производится в декартовой системе координат. Вид компонент тензора 4-го порядка q_{ijkl} определяется реологией среды. Для линейно-упругого тела

$$q_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu \delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}$$

Вторая группа уравнений представляет собой продифференцированный по времени закон Гука:

$$\dot{\sigma}_{ij} = \lambda \dot{\epsilon}_{11} + \dot{\epsilon}_{22} + \dot{\epsilon}_{33} \delta_{ij} + 2\mu \dot{\epsilon}_{ij}$$

или

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2\mu} \left(\dot{\sigma}_{ij} - \frac{\lambda}{3K} (\dot{\sigma}_{11} + \dot{\sigma}_{22} + \dot{\sigma}_{33}) \delta_{ij} \right)$$

В этих соотношениях λ и μ – упругие постоянные Ляме, $K = \lambda + \frac{2}{3}\mu$ – коэффициент всестороннего сжатия, а δ_{ij} – символ Кронекера.

Рассмотрим приведенные нестационарные уравнения теории упругости для случая двух переменных x_1 и x_2 . Первая строка дает два уравнения движения, вторая – четыре реологических соотношения. Составим вектор искомых функций, также состоящий из 6 компонент $\vec{u} = \|v_1, v_2, \sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{22}, \sigma_{33}\|$

Перечисленные модели твердого тела допускают запись системы уравнений динамики деформируемого твердого тела в следующем матричном виде:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \mathbf{A}_1 \frac{\partial \vec{u}}{\partial x_1} + \mathbf{A}_2 \frac{\partial \vec{u}}{\partial x_2} = 0$$

Здесь \mathbf{A}_i - матрицы размера 6×6 , явный вид которых в подвижной системе координат, связанной с деформируемым телом (лагранжева система)

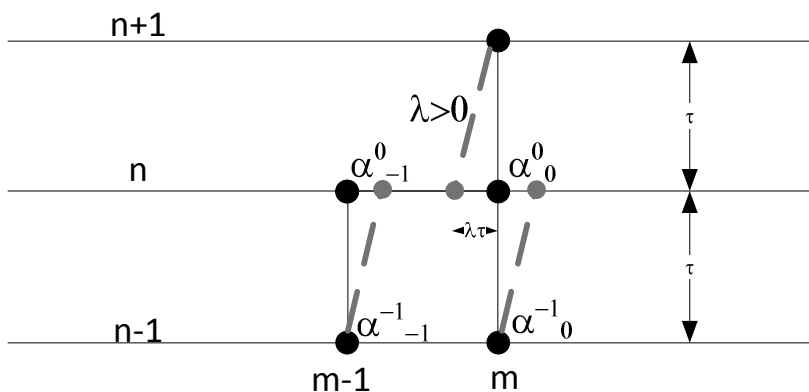
$$\mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{\rho} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\rho} & 0 & 0 \\ -\lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\rho} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\rho} & 0 \\ 0 & -\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Данная запись является канонической формой системы уравнений, принятой в вычислительной математике для построения сеточно-характеристических разностных схем. Предполагается, что эта система является гиперболической, то есть матрицы \mathbf{A}_i имеют шесть вещественных собственных значений и базис из собственных векторов. Для широкого диапазона значений параметров задач геофизики, покрывающего почти все практически значимые случаи, это предположение выполняется.

Глава 2

В этой главе описывается численный метод решения и реализованные в программе схемы. Формулируется и обосновывается компактная трехслонная схема следующего вида:



В главе приведены теоретическое обоснование схемы и ее анализ. Показано, что при

$$\alpha_{-1}^0 = -2\sigma(1 - 2\sigma)/(1 + \sigma),$$

$$\alpha_{-1}^{-1} = 2\sigma,$$

$$\alpha_0^0 = 2(1 - 2\sigma),$$

$$\alpha_0^{-1} = -(1 - \sigma)(1 - 2\sigma)/(1 + \sigma)$$

она имеет третий порядок аппроксимации. Дальше в главе формулируется общий подход к решению двумерных задач, которые описываются предложенной системой уравнений. За основу взят метод расщепления по пространственным координатам, в котором интегрирование одного шага по времени разбивается на несколько этапов. На каждом этапе решается одномерное уравнение переноса, что позволяет эффективно использовать предложенную компактную схему более высокого порядка точности.

Глава 3

В этой главе проведено детальное исследование предложенной компактной схемы. Изучение поведения схемы было проведено в два этапа, сначала было изучено поведение решения шаблона при решении одномерного уравнения переноса. На рис. 1 приведено сравнение предлагаемой схемы для характерных начальных условий:

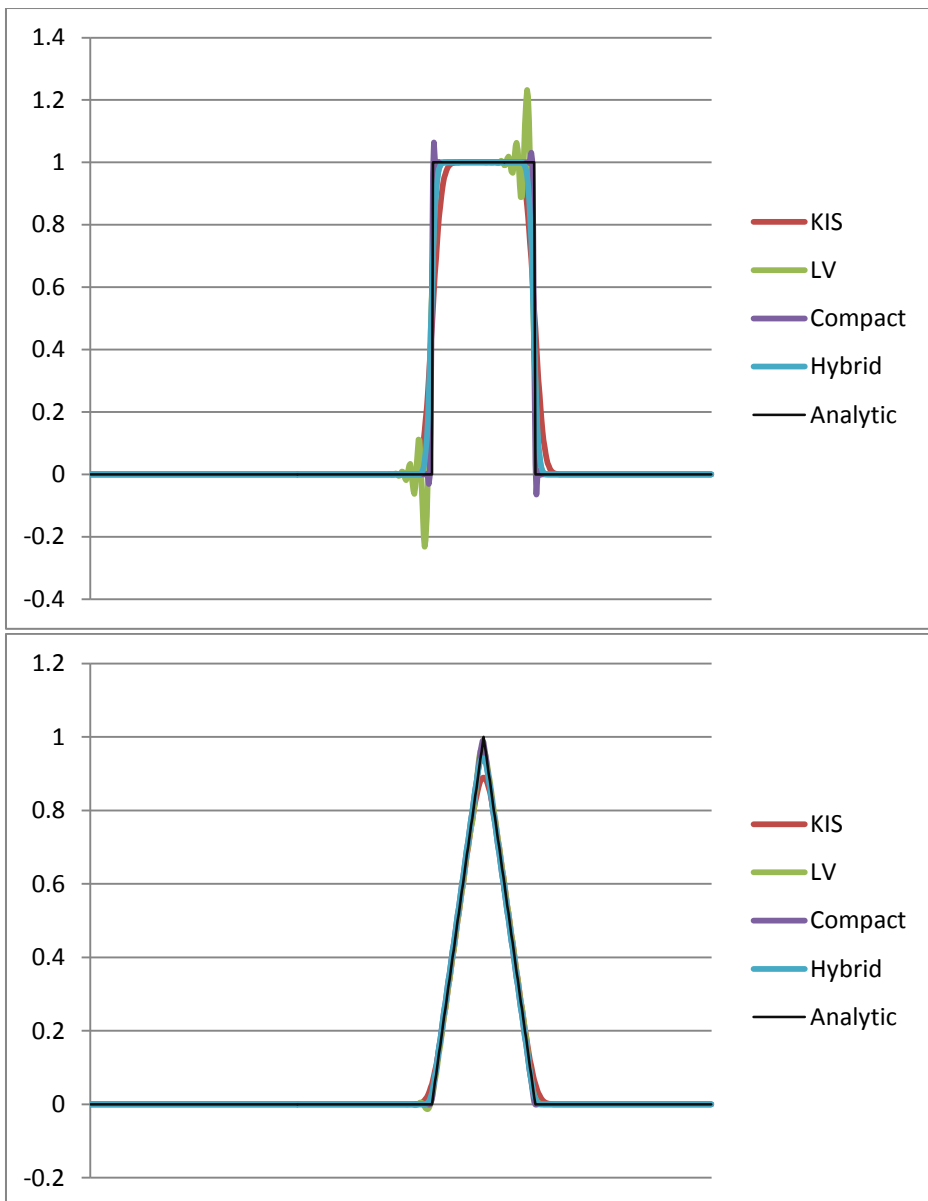


Рис 1.

После приведения детального анализа схемы в главе показана ее верификация и применения для решения двумерных задач на

прямоугольных сетках. На рис. 2 приведен результат моделирования отражения от прямоугольного газонасыщенного резервуара.

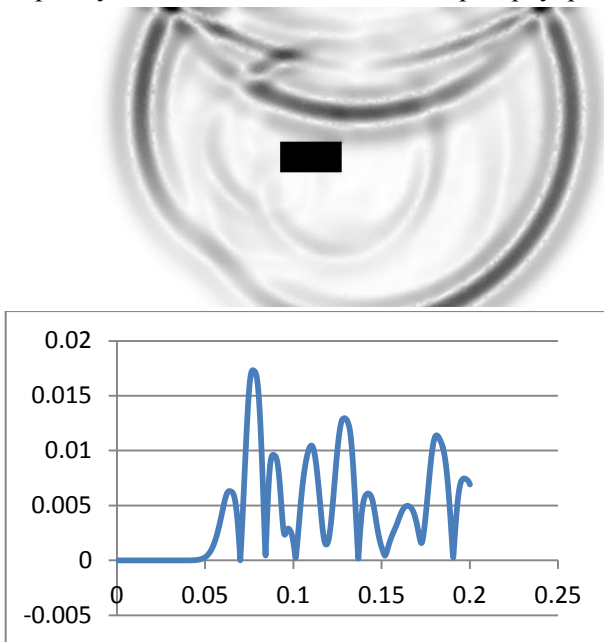


Рис 2.

В главе также приводится сравнение данной схемы с уже исследованной и использованной гибридной схемой на основе схемы Лакса-Вендрофа и Куранта-Изаксона-Риса. При моделировании отмечено, что схема обладает повышенным порядком аппроксимации, одного при реализации в программном коде требует в полтора раза больше оперативной памяти по сравнению с схемами на базе двухслойных шаблонов.

Глава 4

В этой главе методом численного моделирования исследуется характер отраженных продольных и обменных волн, обусловленных рассеянием упругой энергии от трещиноватых зон в массивных породах. Анализируется влияние плотности, наклона и характера заполнения трещин на энергетический уровень продольных PP и обменных PS волн

при регистрации вертикальной и горизонтальной компоненты сейсмического сигнала. Выявлены существенные различия их уровней. Показано, что соотношение энергии различных компонент продольных и обменных волн может быть использовано для прогнозирования характера заполнения и наклона трещин. Предварительно также наметилась потенциальная возможность по величине этих соотношений оценивать плотность газонасыщенных вертикальных трещин в ранее выявленных трещиноватых резервуарах.

На рис. 3 показан пример выделения областей волнового поля для оценки энергии продольных PP и обменных PS волн при регистрации горизонтальной компоненты – а, вертикальной компоненты – б и при модульном представлении волнового поля – в.

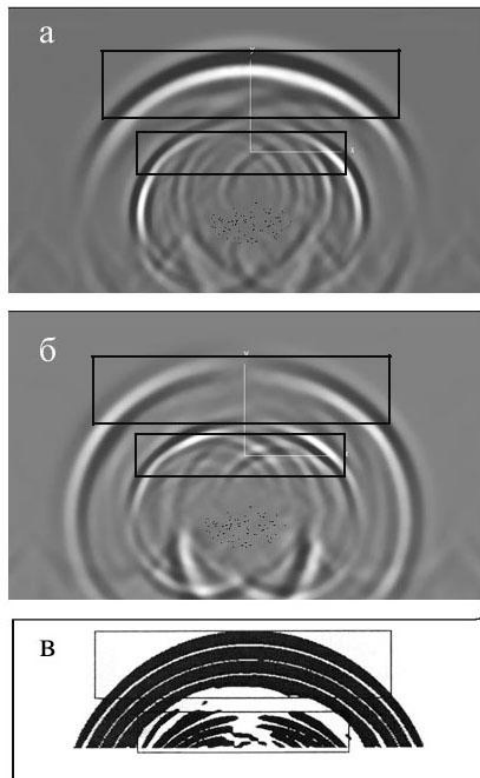


Рис 3.

В главе приведен анализ и сформулированы результаты для серии из 32 волновых полей отклика обратного рассеяния от зоны трещиноватого коллектора в массивных породах для широкого набор его характеристик: наклона, плотности трещин и типа заполнения газов или флюидом.

1. Установлены и количественно оценены существенные изменения энергии продольных PP волн и обменных PS волн, т.е. компонентов отклика обратного рассеяния– в зависимости от наклона и характера заполнения трещин при X и Y регистрации.
2. Проведено исследование волновых полей, соотношений энергии продольных и обменных волн при X и Y регистрации. Наиболее значительные 4х÷6-ти кратные изменения этих соотношений связаны с характером заполнения трещин и частично с изменением их плотности. Изменение наклонов трещиноватости сказывается существенно меньше в 1,5 – 2 раза.
3. Соотношение значений энергии различных компонент E_y^{PP} , E_x^{PS} , E_x^{PP} может быть использовано для прогнозирования характера заполнения и наклона трещин, используя предварительно наметившиеся закономерности.
4. Для вертикальных газонасыщенных трещин показана принципиальная возможность прогнозирования плотности трещин в слое с использованием линейной зависимости от плотности трещин соотношения уровней энергии продольной и обменной волн E_y^{PP} / E_x^{PS} , соответственно при X и Y регистрации.

В главе делается вывод, что совместная регистрация вертикальной (Y) и горизонтальной (X) компоненты сейсмических сигналов обратного рассеяния расширит возможности их использования для выявления и изучения трещиноватых резервуаров в массивных породах.

Глава 5

В данной главе приведено сравнение различных моделей трещиноватых неоднородностей, используемых геологами для моделирования. Рассмотрены такие модели бесконечно-тонких трещин, как модель Хадсона (Hudson), модель Феллера (Fehler) и модель Шоенберга (Schoenberg). Все рассмотренные модели основаны на условии линейного сцепления и были промоделированы с помощью реализованных граничных условий на контакте двух тел. На рис. 4 показана принципиальная схема, которая была использована для верификации условий методом численного моделирования.

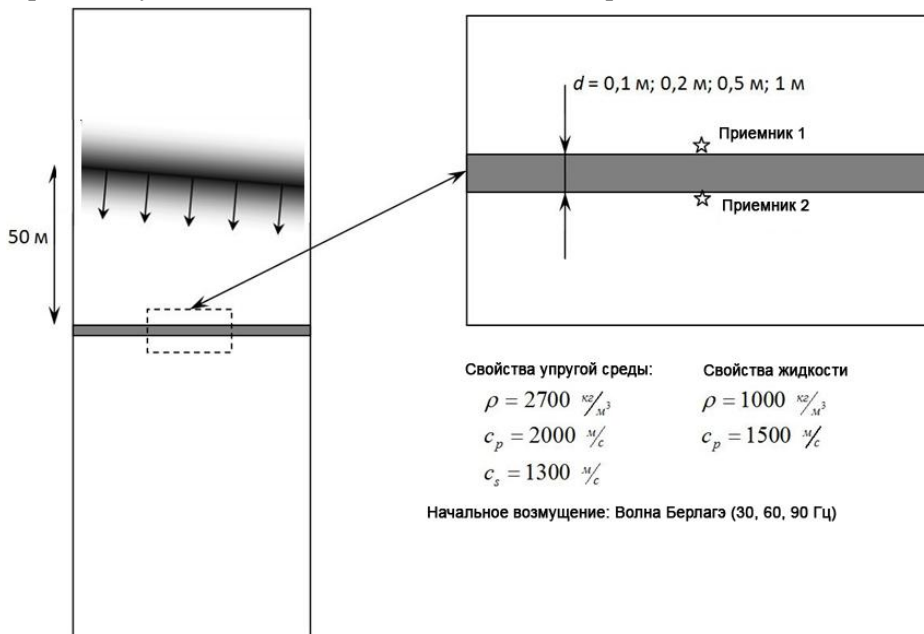


Рис. 4

В главе приведены различные сравнение перечисленных выше моделей с условиями полного сцепления контактирующих тел и условиями скольжения границ. Показано, что модели применимы для численного моделирование неоднородностей в геологической и среде и

могут быть использованы для расширения способов задания осредненных условий в случаях, когда особенности постановки задачи не позволяют задавать каждый элемент разрыва решения явно.

Далее в главе предложены новые модели трещин в породе, основанных на корректном задании серии упорядоченных бесконечнотонких трещин с заданным условием свободной поверхности на границе. На рис. 5 приведена схема задания такой модели и сейсмограмма, как результат моделирования:

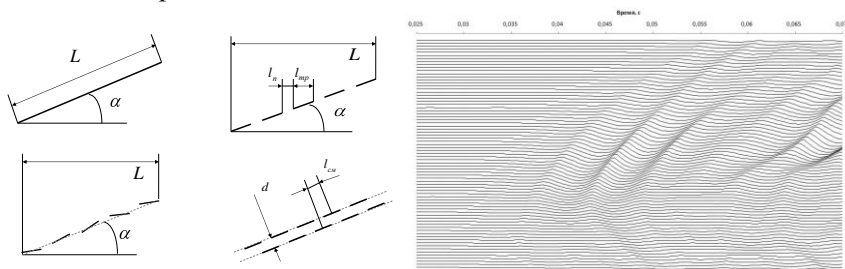


Рис. 5

Данная модель позволяет строить более сложные модели трещин основе более простых. Такое построение упрощает разработку программного комплекса и сложность реализации новых подходов к изучению гетерогенных сред.

Глава 6

В данной главе с использованием сеточно-характеристического метода выполнено численное моделирование распространения упругих волн в изотропной среде с субвертикальной мегатрещиной высотой порядка длины и толщиной в $1/6 - 1/20$ сейсмической волны.

Исследованы волновые отклики и особенности дифрагированных волн, формирующих сейсмический отклик от мегатрещины при разных вариантах ее внутреннего строения, заполнения газом или жидкостью и внешних параметров (высоты и толщины). Показано, что основным источником информации о мегатрещине являются дифрагированные волны. В многослойном разрезе от нижележащих границ дополнительно будут регистрироваться волны отраженные от падения дифрагированной волны на границы и вторично отраженные

от мегатрещины (дуплексные отражения). Их использование затруднено близким временем прихода и соответствующей интерференцией.

На рис. 6 приведен один из расчетов, на базе которых проводилось изучение поведения мегатрещин в геологических средах.

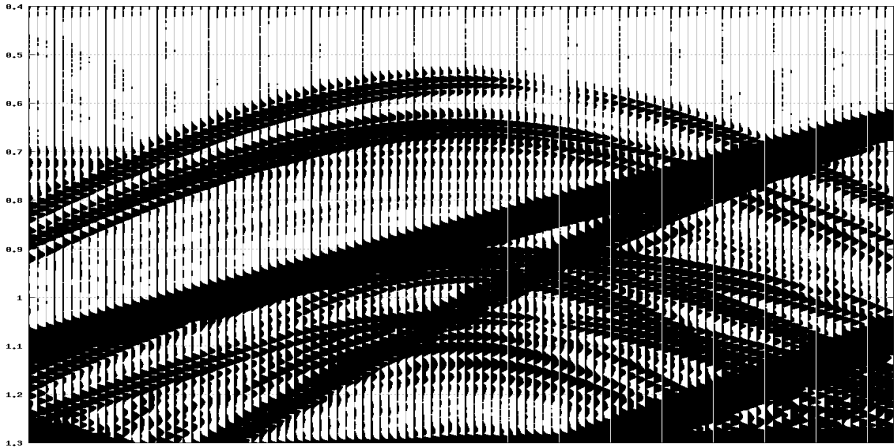


Рис. 6

На основе проведенных расчетов в главе сформулированы следующие выводы:

1. В геологической среде сейсмический отклик от мегатрещины в результате прохождения через нее фронта продольных колебаний состоит из двух продольных и двух обменных дифрагированных волн от ее верхнего и нижнего концов.
2. Отличие характера волн отклика при насыщении макротрещин жидкостью или газом, проявляется: а) в наличии перехода на фазу (смены полярности) над мегатрещиной у продольной дифрагированной волны D_{pp-1} при насыщении жидкостью и его отсутствии у этой волны при газонасыщении; б) в наличии перехода на фазу у обменной дифрагированной волны D_{ps} при газонасыщении и его отсутствии при насыщении жидкостью; в) в большей интенсивности на Z -компоненте продольных дифрагированных волн (особенно D_{pp-1}) при

- газонасыщении и обменных дифрагированных волн, регистрируемых на Х-компоненте при насыщении жидкостью.
3. Сравнение волновых откликов от мегатрещин с различным внутренним строением показало:
 - a. сходство основных элементов волновых откликов у всех моделей;
 - b. преобладающую роль в отклике играют продольные дифрагированные волны и в частности волна от нижнего конца мегатрещины;
 - c. наибольшую интенсивность сейсмических откликов у моделей с наиболее высокой потенциальной проницаемостью (максимальным числом субвертикальных макротрещин)
 5. Влияние внешних параметров мегатрещины несущественно сказывается на характере волнового отклика, проявляясь только в степени разделенности дифрагированных волн от верхнего и нижнего концов мегатрещины.
 6. Влияние нижележащей субгоризонтальной отражающей границы проявляется в образовании:
 - a. интенсивных отраженных волн с концентрическими фронтами и продольным характером колебаний, обусловленных падением на нижележащую акустическую границу дифрагированной продольной волны от мегатрещины (с последующей конвертацией) ;
 - b. слабых вторичных дифрагированных продольных волн с крутизной годографов первичных дифракций;
 - c. предположительно дуплексного отражения, выделяемого в направлении наклона мегатрещины на больших удалениях, сопоставимых с ее глубиной ($x > h$).

4. Выделение предположительно дуплексного отражения затруднено интерференцией с регистрируемым на близких временах отражением от нижележащей границы падающей на нее нижней части продольной дифрагированной волны от мегатрещины. Эта волна и дуплексное отражение, сходны по кинематике.

Заключение

В заключении подробно изложены основные результаты и выводы диссертации.

Основные результаты и выводы диссертации

1. Разработаны математические и численные модели неоднородностей для задач сейморазведки, основанные на граничных условиях Шоенберга, Феллера и Хадсона.
2. Предложен компактный шаблон и выполнена его реализация для решения задач линейной упругости на прямоугольных сетках.
3. Реализован комплекс программ, позволяющий:
 - задавать тип сетки и шаблона, которые будут использованы для решения задачи;
 - гибко задавать геометрию и граничные условия решаемой задачи;
 - задавать параметры сейсмограмм и срезов в виде, согласованном с полевыми испытаниями;
 - сравнивать сейсмограммы.
4. На основании численного моделирования предложены практические рекомендации по использованию величин энергий сейсмического отклика для определения количественного и качественного состава неоднородностей.

5. На основании численных экспериментов подтверждена важность использования горизонтальной компоненты сейсмозаписи для изучения трещиноватости геосреды.

Список публикаций соискателя по теме диссертации

1. *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.
2. *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.
3. *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.
4. *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.
5. *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, P. 399 – 409.
6. *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, P. 196 – 204.
7. *Панкратов С. А., Петров И. Б.* Исследование и поиск закономерностей в отклике сейсмосигнала в задачах сейсморазведки. Москва, «Моделирование и обработка информации» 2008, С. 32-37.
 8. *Панкратов С. А., Мацневский Н. С., Петров И. Б.* Численное моделирование деформационных динамических процессов в задачах сейсморазведки сеточно-характеристическим методом. Москва, «Моделирование и обработка информации» 2007, С. 30-37.
 9. *Панкратов С. А.* Численное моделирование деформационных динамических процессов в задачах сейсморазведки. Москва-Долгопрудный. «Труды 50-й научной конференции МФТИ», 2007, ч. VII, т. 1, С. 58-59
 10. *Панкратов С. А.* Численное исследование поведения различных моделей трещин в упругой среде. Москва-Долгопрудный. «Труды 50-й научной конференции МФТИ», 2010, ч. VII, т. 2, С. 46-47
 11. *Левянт В. Б., Петров И. Б., Панкратов С. А.* Исследование характеристик продольных и обменных волн отклика обратного рассеяния от зон трещиноватого коллектора. Технологии сейсморазведки», 2009, N2, С. 3-11
 12. *Левянт В. Б., Петров И. Б., Панкратов С. А.* Исследование волнового отклика от субвертикальных мегатрещин нефтяных и газовых месторождений методом численного моделирования. Технология сейсморазведки, 2012. N2, С. 42-56

Личный вклад соискателя в работы с соавторами

1. Разработаны и реализованы в виде комплекса программ модели неоднородностей в геологических породах, основанные на граничных условиях Шоенберга, Феллера и Хадсона. Проведена серия численных экспериментов по сравнению предложенных моделей друг с другом.
2. С помощью математического моделирования получены и исследованы свойства волновых откликов, в том числе энергетические, от мегатрещин.
3. Предложена и реализована разностная сеточно-характеристическая схема на компактном трехслойном шаблоне. На базе этой схемы сформулирован и проверен численный метод для решения двумерных задач сейсморазведки
4. Реализован комплекс программ для исследования динамических волновых задач в неоднородных телах в одномерном и двумерном случаях (на треугольных и прямоугольных сетках).

Панкратов Сергей Александрович

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ
ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗАДАЧАХ
СЕЙСМОРАЗВЕДКИ**

Автореферат

Подписано в печать 6.11.2012. Формат 60 x 84 1/16. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 80 экз. Заказ № 601.

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