

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени И. РАЗЗАКОВА
КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СТРОИТЕЛЬСТВА, ТРАНСПОРТА И АРХИТЕКТУРЫ
имени Н. ИСАНОВА**

Диссертационный совет Д.01.15.505

На правах рукописи
УДК 539.3

САРСЕНОВ БАКЫТБЕК ТЕМИРБЕКОВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ МАССИВА
В ОКРЕСТНОСТИ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЕСЕНИЯ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Бишкек - 2015

Работа выполнена в Кыргызском государственном техническом университете имени И.Раззакова и РГП «Институт математики и математического моделирования» Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан

Научные руководитель: доктор физико-математических наук, профессор **Дуйшеналиев Туратбек Болотбекович**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор **Рычков Борис Александрович**

доктор физико-математических наук, профессор **Назарова Лариса Алексеевна**

Ведущая организация: Институт геомеханики и освоения недр НАН КР, 720017, г. Бишкек, улица Медерова 98

Защита состоится 29 мая 2015 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д.01.15.505 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора (кандидата) наук при Кыргызском государственном техническом университете имени И.Раззакова и Кыргызском государственном университете строительства, транспорта и архитектуры имени Н.Исанова по адресу: 720044, Кыргызская Республика, г. Бишкек, пр. Мира 66, ауд. 1/314.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Кыргызского государственного технического университета им. И.Раззакова (720044, г. Бишкек, пр. Мира, 66) и Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н.Исанова (720020, г. Бишкек, ул. Малдыбаева, 34б)

Автореферат разослан « 24 » апреля 2015 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м.н.

Б.Т.Мекенбаев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертационной работе разработана математическая модель динамики породного массива в окрестности очага землетрясения. Для исследования процессов формирования поверхностных сейсмических волн и определения их воздействия на наземные сооружения в окрестности очага землетрясения решена, на основе численного метода бихарактеристик, нестационарная контактная задача динамики упругого полупространства с упругим поверхностным включением при дифракции сейсмических волн, порождаемых сбросом напряжений на трещине в породном массиве. Построены дифракционные картины процессов распространения, отражения и преломления сейсмических волн, характеризующие поля скоростей и напряжений в среде и поверхностном включении, осциллограммы скоростей и напряжений на дневной поверхности, и проведено исследование волновых процессов при разном типе сейсмического воздействия, моделирующего процессы образования в земной коре трещин отрыва и сдвига.

Актуальность темы диссертации. Исследование динамических процессов в твердых деформируемых телах является в настоящее время одной из наиболее актуальных проблем механики, представляющей теоретический и практический интерес. Для более экономного использования материалов при проектировании и строительстве инженерных сооружений необходимо учитывать не только статические нагрузки на объекты, но и динамические. Силовые динамические нагрузки невозможно определить без изучения полной пространственно-временной картины напряженного состояния объекта, возникающего при распространении упругих волн в телах. Поэтому, исследование неустановившихся процессов в механике твердого тела приобретает в настоящее время все большее значение.

Над динамическими проблемами теории упругости работали многие выдающиеся ученые: Л.Ж.Лагранж, Г.Ламе, С.Д.Пуассон, М.В. Остроградский, Дж.Г.Стокс, А.Ж.К. Сен-Венан, Р.Релей и многие др. Ими были созданы основы общего учения об упругих колебаниях и волнах.

Динамика упругого полупространства при действии внутренних источников изучена гораздо меньше. Решение задач стационарной дифракции цилиндрических и сферических волн на границе

полупространства, порождаемых внутренними сосредоточенными источниками, получено Алексеевой Л.А. и Дильдабаевым Ш.А. При этом авторами использовался метод перерасложения цилиндрических и сферических волн на плоские и интегральные Фурье-разложения и преобразование Фурье и Лапласа по времени. Аналитического решения подобной задачи в нестационарной постановке в исходном пространстве-времени пока нет. Поэтому актуальной является разработка численных методов решения задач нестационарной дифракции волн в упругом полупространстве при действии внутренних источников возмущений.

Здесь в качестве источника возмущений рассматривается прямолинейная трещина, на поверхности которой происходит сброс напряжений, вертикальных, что характерно для трещин разрыва, и горизонтальных, что характерно для трещин сдвига. Задача является модельной для исследования динамики массива в окрестности очага землетрясения и на дневной поверхности в окрестности эпицентра, что также обуславливает ее актуальность.

Связь темы диссертации с крупными научными программами, основными научно-исследовательскими работами, проводимыми научными учреждениями. Работа выполнялась в Институте математики и математического моделирования КН МОН РК и Кыргызском государственном техническом университете им. И.Раззакова. Исследования выполнены в рамках научно-исследовательских работ по темам:

– «Обобщенные решения краевых задач волновой динамики деформируемых твердых и электромагнитных сред» (2009–2011гг, направление 1.5 «Качественный анализ дифференциальных уравнений и методы решения задач математической физики» по Программе Фундаментальных исследований Ф.0508 «Актуальные проблемы физики, математики, механики и информатики»)

– «Дифракция волн в упругих, термоупругих и многокомпонентных средах» по бюджетной подпрограмме РК 101 «Грантовое финансирование научных исследований», приоритет «Интеллектуальный потенциал страны, подприоритет «Фундаментальные исследования в области естественных наук», грант 1022/ГФ2 (2012-2014);

Цели и задачи исследования. Разработка математической модели процессов распространения и дифракции сейсмических волн с использованием модели упругого полупространства с

поверхностным упругим включением в условиях плоской деформации;

Для достижения этой цели поставлены следующие задачи исследования:

- построить математическую модель динамического поведения упругой полуплоскости со свободной поверхностью при сбросе напряжений на горизонтальной трещине,
- на основе численного метода бихарактеристик разработать пакет прикладных программ для численных расчётов поля скоростей и напряжений в упругой полуплоскости при сбросе напряжений на прямолинейной трещине;
- провести численные эксперименты и анализ напряжённо-деформированного состояния полуплоскости при сбросе вертикальных и горизонтальных напряжений на трещине;
- построить математическую модель динамического поведения упругой полуплоскости с упругим поверхностным включением прямоугольной формы при дифракции и преломлении упругих волн на контактной поверхности,
- на основе метода бихарактеристик Тарабрина разработать пакет прикладных программ для численных расчётов напряжённо-деформированного состояния рассматриваемого включения при дифракции и преломлении на контактной поверхности нестационарных упругих волн в упругой полуплоскости;
- провести с последующим анализом многовариантные расчёты напряжённо-деформированного состояния рассматриваемого тела в зависимости от физико-механических и геометрических параметров, контактных условий и типа нагрузки.

Научная новизна полученных результатов. Дано дальнейшее развитие математической модели и пакетов прикладных программ для исследования нестационарного напряжённо-деформированного состояния земной поверхности и наземных сооружений, обусловленных сбросом тектонических напряжений на глубинных трещинах в земной коре.

Достоверность результатов работы подтверждается:

- корректностью математической постановки задачи;
- строгостью используемого математического аппарата;
- выполнением необходимых условий устойчивости и численной проверкой устойчивости метода расчета;

– соответствием полученных результатов физическому содержанию поставленной задачи.

Практическая значимость полученных результатов.

Разработанные математическая модели и пакеты компьютерных программ для решения задачи нестационарной дифракции волн в упругом полупространстве с прямоугольным упругим включением на его поверхности при нестационарной дифракции волн позволяют исследовать динамику массива и наземных сооружений в окрестности очага землетрясения с учетом их физико-механических свойств (плотность сред, упругие параметры), геометрических параметров (размеры сооружения, глубина трещины, расстояние от эпицентра), а также моделировать разнообразный тип сейсмического воздействия при разном типе трещин в земной коре.

Результаты проведенных исследований полезны для разных областей знания, особенно для физики Земли и сейсмологии для понимания сейсмических явлений в земной коре и наземных сооружений. Разработанные пакеты компьютерных программ можно рекомендовать для применения при решении обширного круга задач теории упругости, геофизики и сейсмологии.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

– для исследования состояния земной поверхности, обусловленного сбросом тектонических напряжений на глубинных трещинах в земной коре при землетрясениях разработана математическая модель динамики упругого полупространства при сбросе напряжений на горизонтальной трещине в условиях плоской деформации.

– на основе явной разностной схемы численного метода бихарактеристик разработан алгоритм и пакет компьютерных программ на алгоритмическом языке программирования DELPHI для определения состояния массива и дневной поверхности при сбросе напряжений на горизонтальной трещине.

– проведены многовариантные численные эксперименты и анализ напряженно-деформированного состояния земной поверхности при дифракции сейсмических волн. Построены дифракционные картины процессов распространения и отражения сейсмических волн, характеризующие поля скоростей и напряжений в земной коре, осциллограммы скоростей и напряжений на дневной поверхности, и проведено исследование волновых процессов при разном типе сейсмического воздействия, моделирующего процессы образования в земной коре трещин отрыва и сдвиговых трещин.

– разработана математическая модель дифракции и преломления сейсмических волн в прямоугольном упругом поверхностном включении на упругом полупространстве при жестком контактном взаимодействии.

– на основе явной разностной схемы разработан алгоритм и пакет компьютерных программ на языке DELPHI для исследования напряженно-деформированного состояния наземного сооружения при дифракции сейсмических волн, обусловленный сбросом тектонических напряжений на глубинных трещинах в земной коре.

– проведены многовариантные численные эксперименты и анализ напряженно-деформированного состояния поверхностного включения при дифракции упругих волн, обусловленных сбросом напряжений на горизонтальной трещине в упругом полупространстве.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном выполнении исследований по всем главам и звеньям диссертации: выводе всех аналитических соотношений динамики упругого полупространства с поверхностным включением при сбросе напряжения на глубинной трещине; разработке алгоритмов решения задач, составлении компьютерных программ и проведении на их основе многовариантных численных экспериментов; обработке и анализе результатов расчётов; формулировке научных выводов.

Апробации результатов диссертации. Основные результаты по теме диссертации докладывались на научных семинарах и международных конференциях: Международный Джодасбековский симпозиум (Алматы, 2011), Международная конференция посвященная памяти академика Н.Н.Яненко (Новосибирск, 2011), Международная конференция посвященная памяти академика М.Я. Леонова (Бишкек, 2012), Международная конференция посвященная 60-летию КГТУ им. И.Раззакова (Бишкек, 2014).

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях. По теме диссертационной работы опубликовано 18 научных работ, в том числе 7 статей в научных журналах, 7 статей в сборниках и 4 тезиса конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, двух глав, вывода, списка использованной литературы и приложения, содержит 122 рисунка и список литературы из 71 наименований, всего, 110 страниц машинописного текста без приложения.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность за постановку задач и научные консультации доктору физико-математических наук, профессору Алексеевой Л.А. и доктору физико-математических наук, профессору Дуйшеналиеву Т.Б.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении диссертации представлена оценка современного состояния рассматриваемой научной проблемы, обоснованы актуальность темы и выбор объекта исследования, сформулирована цель работы и поставлены задачи для её достижения, отражена научная новизна проведенных исследований, а также дан обзор предшествующих работ, имеющих отношение к её теме.

Для решения нестационарных динамических задач в упругих средах к настоящему времени разработаны разнообразные численные методы: конечно-разностный метод пространственных характеристик в работах Клифтона Р.Д., Рекера В.В. и др., метод распада разрыва в работах Годунова С.К., метод дробных шагов в работах Яненко Н.Н., метод бихарактеристик в работах Тарабрина Г.Т., численные методы в работах Кукуджанова В.Н., Кондаурова В.К., Чебан В.Г. и др.

Наиболее исследованы процессы распространения волн в слоистых упругих средах в работах Бреховских А.Н., Петрашеня Г.И., Соболева С.Л. и др. с использованием аналитических методов. Задачи динамического контактного взаимодействия упругих сред с упругими оболочками рассматривались в работах Ержанова Ж.С., Каримбаева Т.Д., Айталиева Ш.М., Алексеевой Л.А., Байтелиева Т.Б., Масанова Ж.К. и др.

В первой главе для исследования состояния земной поверхности, обусловленного сбросом тектонических напряжений на глубинных трещинах в земной коре при землетрясениях, с использованием основных уравнений линейной теории упругости поставлена модельная нестационарная краевая задача дифракции волн в упругом полупространстве при сбросе напряжений на горизонтальной трещине. На основе численного метода бихарактеристик разработан алгоритм ее решения в условиях плоской деформации и пакет компьютерных программ на языке DELPHI.

Постановка задачи. Пусть упругая изотропная среда D (рис.1) с коэффициентами Ламе λ , μ и плотностью ρ занимает полупространство $x_1 \geq 0$. Рассмотрим динамику среды в условиях

плоской деформации при сбросе напряжений на горизонтальной трещине S , которая расположена на глубине L ($x_1=L, |x_2|\leq d$).

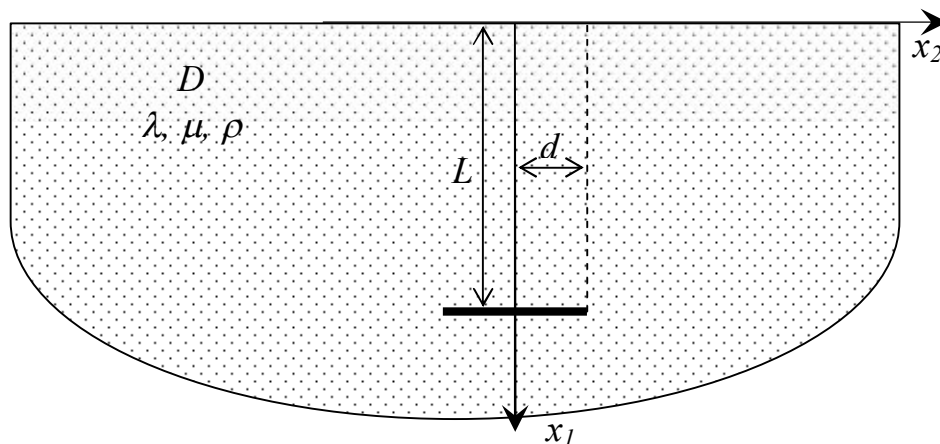


Рис. 1. Полу плоскость с горизонтальной трещиной (расчетная схема).

Предполагается, что в начальный момент среда покоится:

$$\mathbf{u} = 0, \dot{\mathbf{u}} = 0 \text{ при } x_1 \geq 0,$$

а граница полупространства (*дневная поверхность*) свободна от внешних нагрузок: $\sigma_{11} = \sigma_{12} = 0$ при $x_1 = 0$.

Здесь и далее $\mathbf{u}=(u_1, u_2)$ – перемещения среды, σ_{ij} – тензор напряжений, x_i – координаты точек среды $\mathbf{x}=(x_1, x_2)$, t – время. Индексами после запятой обозначаются частные производные по декартовым координатам, а точкой сверху – частные производные по времени.

Так как на бесконечности отсутствуют источники колебания, то очевидным является требование, чтобы на бесконечности выполнялись условия затухания:

$$u_j \rightarrow 0, \sigma_{ij} \rightarrow 0 \text{ при } \|x\| \rightarrow \infty.$$

Перемещения среды удовлетворяют уравнениям движения:

$$\sigma_{i\beta,\beta} + F_i = \rho \dot{v}_i, \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

где v_i – компоненты вектора скорости \mathbf{v} ; F_i – проекции объемной силы на соответствующие координатные оси. Здесь и далее по повторяющимся греческим индексам в произведении выполняется суммирование (тензорная свертка), а по повторяющимся латинским индексам суммирования нет.

Связь между компонентами тензора напряжения и компонентами вектора перемещения выражается законом Гука :

$$\sigma_{ij} = \lambda u_{\beta,\beta} \delta_{ij} + \mu(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad i, j = 1, 2, \quad (2)$$

Сброс напряжения на трещине выражается через компоненты F_i объемной силы F и определяются сингулярной обобщенной функцией – простым слоем на трещине S . Здесь они имеют следующий вид:

$$F_i = n_\beta \left[\sigma_{i\beta} \right]_S \delta(x_1 - L) H(d - |x_2|), \quad i, \beta = 1, 2 \quad (3)$$

где выражение в квадратных скобках – скачок компонент тензора напряжений на берегах трещины, \mathbf{n} – единичная нормаль к ее поверхности, $H(x_1)$ – функция Хевисайда, $\delta(x_1)$ – функция Дирака, δ_{ij} – символ Кронекера. Предполагается, что скачок напряжений на трещине известен.

Требуется определить напряженно-деформированное состояние среды и дневной поверхности при сбросе напряжений на трещине.

Бихарактеристики и условия на них. Решение задачи удобно искать в безразмерных переменных. Вводятся независимые переменные и искомые величины :

$$\bar{t} = \frac{tc_1}{L}; \quad \bar{x}_i = \frac{x_i}{L}; \quad \bar{v}_i = \frac{1}{c_1} \frac{\partial u_i}{\partial t}; \quad \sigma_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\rho c_1^2}; \quad \bar{F}_i = \frac{F_i L}{\rho c_1^2};$$

где c_1, c_2 – скорости распространения объемных и сдвиговых волн в упругой среде, L – характерная длина. В дальнейшем черта над безразмерными параметрами опускается.

Уравнения движения (1) и производные по времени от соотношений закона Гука (2) в безразмерных величинах имеют вид:

$$\begin{cases} \dot{v}_i = \sigma_{i\beta,\beta} + F_i \\ \dot{\sigma}_{ij} = \gamma_{ij} v_{i,j} + \gamma_{33} (v_{\beta,\beta} - v_{i,j}) \delta_{ij} + \gamma_{ji} v_{j,i} (1 - \delta_{ij}) \end{cases} \quad (i, j, \beta = 1, 2), \quad (4)$$

где $\bar{\gamma}_{12} = \bar{\gamma}_{21} = (c_2^2/c_1^2)^2$; $\bar{\gamma}_{11} = \bar{\gamma}_{22} = 1$; $\bar{\gamma}_{33} = 1 - 2\bar{\gamma}_{12}$. Для получения уравнения бихарактеристик и условий на них, расщепляем двумерную систему (4) на одномерные. Это можно выполнить, если в системе (4) поочередно зафиксировать одну из пространственных переменных (рис. 2).

При $x_i = const$ ($i \neq j$) имеем:

$$\begin{cases} \dot{v}_i - \sigma_{ij,\bar{j}} = a_{ij} + F_i \\ \dot{\sigma}_{ij} - \lambda_{ij}^2 v_{i,j} = b_{ij} \end{cases} \quad (i, j = 1, 2), \quad (5)$$

где $a_{ij} = \sigma_{i\beta,\beta} - \sigma_{ij,j}$; $\lambda_{ij}^2 = \sqrt{\gamma_{ij}}$; $b_{ij} = \gamma_{33} (v_{\beta,\beta} - v_{i,j}) \delta_{ij} + \gamma_{ji} v_{j,i} (1 - \delta_{ij})$.

Переходя от частной производной к полной по времени из условия существования решения полученной системы определяем дифференциальное уравнение бихарактеристик и условия на них:

$$dx_j = \pm \lambda_{ij} dt \quad (i, j = 1, 2), \quad (6)$$

$$d\sigma_{ij} \mp \lambda_{ij} dv_i = \left(b_{ij} \mp \lambda_{ij} [a_{ij} + F_i] \right) dt \quad (i, j = 1, 2). \quad (7)$$

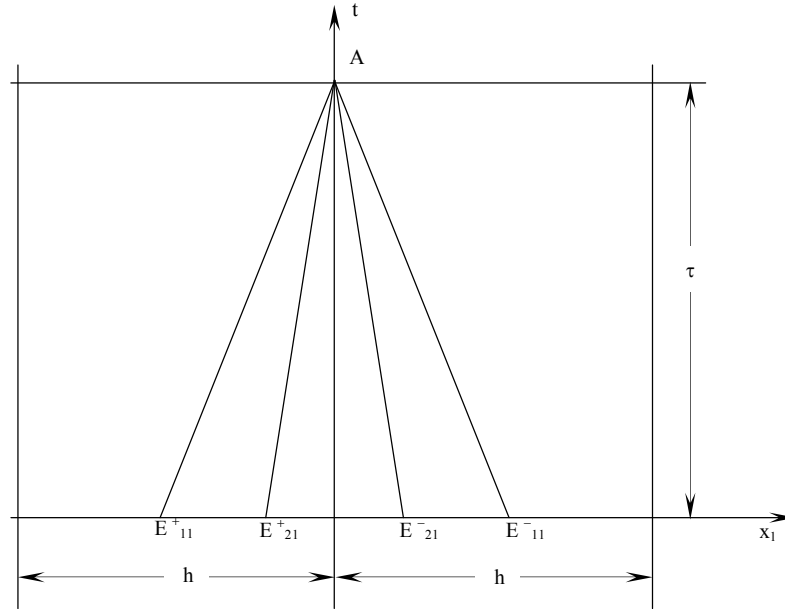


Рис. 2. Вид бихарактеристик на плоскости $x_2 = \text{const}$.

Разрешающие разностные уравнения. Интегрирование методом трапеции уравнения (4) от точки O до точки A и соотношений (7) от точки E_{ij}^{\pm} до точки A позволяют получить выражения следующего вида:

$$\begin{cases} v_i = v_i^0 + \frac{\tau}{2} (\sigma_{ij,j} + a_{ij} + F_i + \sigma_{ij,j}^0 + a_{ij}^0 + F_i^0), \\ \sigma_{ij} = \sigma_{ij}^0 + \frac{\tau}{2} (\lambda_{ij}^2 v_{i,j} + b_{ij} + \lambda_{ij}^2 v_{i,j}^0 + b_{ij}^0), \end{cases} \quad (8)$$

$$\sigma_{ij} - \sigma_{ij}^{\pm} \mp \lambda_{ij} (v_i - v_i^{\pm}) \mp \frac{\tau}{2} (b_{ij} + b_{ij}^{\pm} \mp \lambda_{ij} [a_{ij} + a_{ij}^{\pm} + F_i + F_i^{\pm}]). \quad (9)$$

Исключая из (9) функции σ_{ij} , v_i при помощи (8), и значения функций σ_{ij}^{\pm} , v_i^{\pm} и производных a_{ij}^{\pm} , b_{ij}^{\pm} в не узловых точках разложить по формуле Тейлора в ближней узловой точке с точностью до второго и первого порядка, соответственно, относительно шага τ , можно получить:

$$\begin{aligned} & \sigma_{ij,j} \mp \lambda_{ij} v_{i,j} = \\ & = \sigma_{ij,j}^0 + \tau [\lambda_{ij}^2 v_{i,jj}^0 + b_{ij,j}^0] + F_i^{\pm} - F_i^0 \mp \lambda_{ij} (v_{i,j}^0 + \tau [\sigma_{ij,jj}^0 + a_{ij,j}^0]) \end{aligned} \quad (10)$$

Складывая и вычитая каждое уравнение системы (10) с одинаковыми парами индексов, можно установить:

$$\begin{aligned}\sigma_{ij,j} &= \sigma_{ij,j}^0 + \tau \left[\lambda_{ij}^2 v_{i,jj}^0 + b_{ij,j}^0 \right] + \frac{1}{2} (F_i^- + F_i^+ - 2F_i^0) \\ v_{i,j} &= v_{i,j}^0 + \tau \left[\sigma_{ij,jj}^0 + a_{ij,j}^0 \right] + \frac{1}{2\lambda_{ij}} (F_i^- - F_i^+)\end{aligned}\tag{11}$$

Порядок получения разностных уравнений для внутренних точек таков:

производные функции в правой части системы уравнений (8) и (11) по квадратной сетке для узла $O(x_1^0, x_2^0, t_0)$, лежащего внутри исследуемой области, определяют центральными разностями; производные $\sigma_{ij,j}$, $v_{i,j}$, a_{ij} , b_{ij} на искомом слое ($t=t_0+\tau$) в уравнении (8) определяют из системы уравнений (11). Найденные значения, подставляя в уравнения (8) определяют значения неизвестных функции на искомом слое времени $t=t_0+\tau$. Разностные уравнения для отыскания решения в граничных точках исследуемой области на слое $t=t_0+\tau$ получаются с помощью системы уравнениями (8), (10) и граничных условий. В расчетах из уравнения (10) не могут быть использованы два условия на двух характеристиках, не принадлежащих области D , их заменяют граничные условия.

Динамика упругой полуплоскости при сбросе вертикальных напряжений на трещине. Расчеты произведены для среды с безразмерными параметрами: $\rho=1$, $c_1=1$ и $c_2=0,577$ при глубине и ширине трещины соответственно $L=1$, $d=0,1$, на интервале времени (0; 6). Скачок напряжений на трещине задается в виде импульса:

$$P_1(x,t) = 20 \cdot t \cdot e^{-10t} H(t), \quad P_2(x,t) = 0.$$

В расчетах шаги по пространственной сетке $h_1=h_2=h=0,05$, по временной $\tau=0,025$, а параметр дельтаобразной функции $\varepsilon = h$.

Так как скорости $c_1=1$ и $c_2=0,577$ следует, что объемные и сдвиговые волны от трещины к эпицентру (0; 0) придут в момент $t_1=1$ и $t_2=1,73$ соответственно, а в точку $A(0; 1)$ за $t_1=1,35$ и $t_2=2,33$, в точку $B(0; 2)$ за $t_1=2,15$ и $t_2=3,71$ и в точку $C(0; 3)$ за $t_1=3,07$ и $t_2=5,31$.

На рис. 3 – 5 представлена динамика среды при сбросе вертикальных напряжений на трещине. На осциллограммах скоростей точек дневной поверхности (рис. 3) в указанные моменты времени можно заметить начало движения (всплеск скорости) и дальнейший естественный колебательный характер движения среды.

В эпицентре (точка O) $v_2=0$, т.к. сброс напряжении происходит симметрично и параллельно оси Ox_1 .

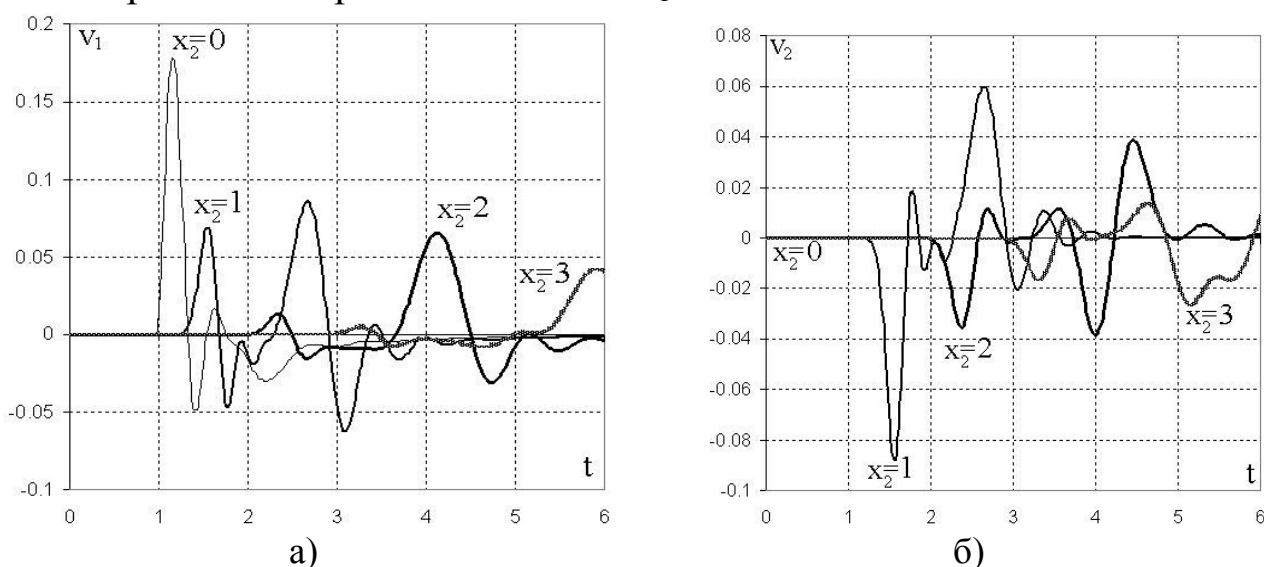


Рис. 3. Осциллограммы скоростей дневной поверхности, при $x_1=0, x_2=0; 1; 2; 3$: а) v_1 и б) v_2 .

На рис.4, 5 представлены дифракционные картины поля скоростей до отражения ударных волн и после. Можно заметить, что края трещины работают как источники цилиндрических сдвиговых волн, в окрестности концов трещины образовалось вихревое поле, что характеризует сдвиговые волны. Возникает сложная дифракционная картина взаимодействия падающих и отраженных ударных волн, формируется сложное напряженно-деформированное состояние среды, которое можно увидеть на рис.5.

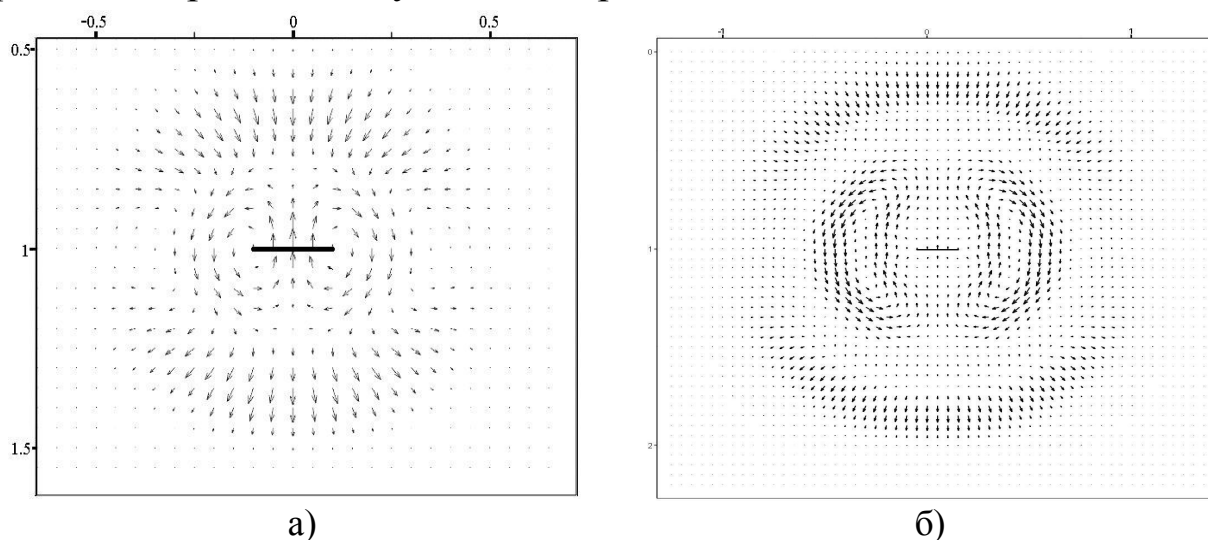


Рис. 4. Векторное поле скоростей до отражения ударных волн: а) $t=0,5$ и б) $t=1$.

Взаимодействие объемных и сдвиговых волн с дневной поверхностью и между собой (после отражения) порождают разные

волны, среди них релеевские. На рис.5 заметно, как начинает формироваться волна вдоль дневной поверхности, образуя поверхностную волну Релея. В данной среде она распространяется со скоростью $c_R=0,918 \cdot c_2$, т.е. близко к скорости распространения сдвиговой волны. Волны, идущие от трещины вниз, не встречая препятствий, рассеиваются с глубиной и с течением времени.

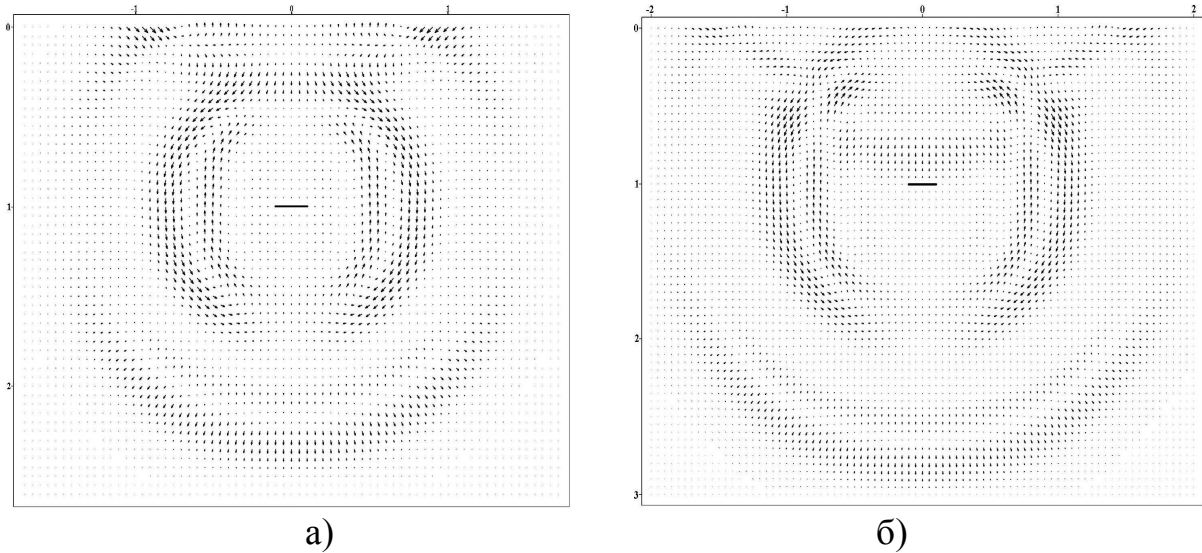


Рис. 5. Векторное поле скоростей после отражения ударных волн: а) $t = 1,5$ и б) $t = 2$.

На рис.6 представлено изменение с течением времени компоненты нормальных напряжений на вертикальных площадках дневной поверхности и в глубине массива, по которым можно оценивать прочностные свойства массива при сейсмических воздействиях.

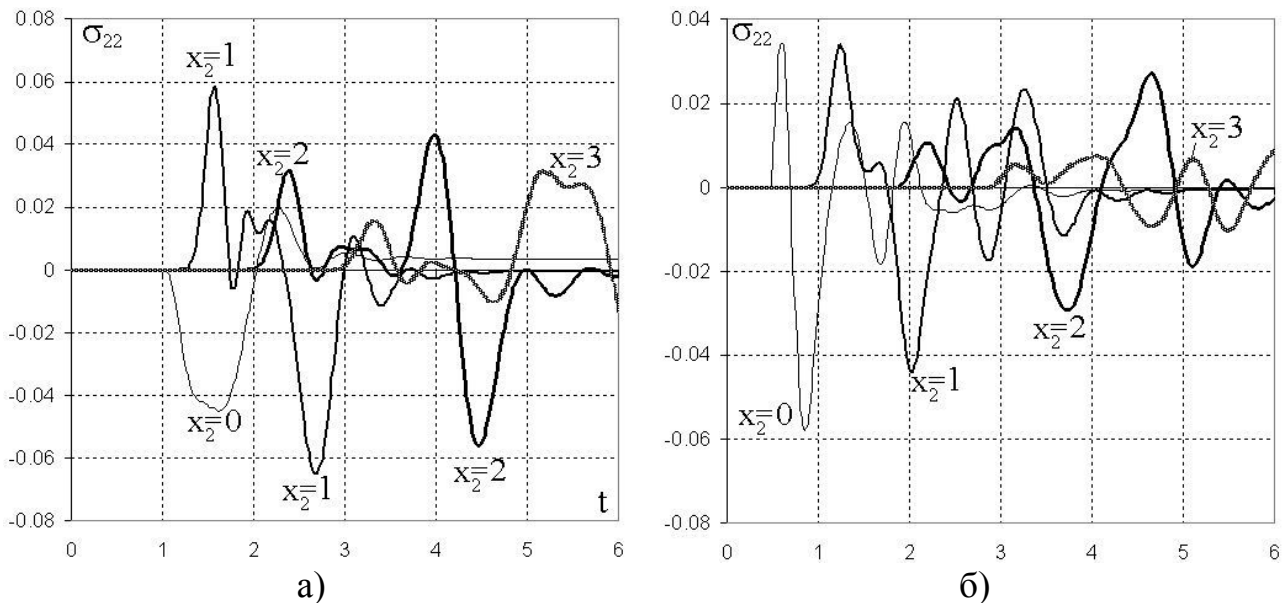


Рис. 6. Осциллограммы напряжений σ_{22} при $x_2=0; 1; 2; 3$: а) на поверхности $x_1=0$ и б) на глубине $x_1=0,5$

Переход к размерным величинам проводим по следующим формулам:

$$t = \frac{\bar{t}L}{c_1}; \quad x_i = \bar{x}_i L; \quad v_i = \bar{v}_i c_1; \quad \sigma_{ij} = \bar{\sigma}_{ij} \rho c_1^2;$$

где черта указывает на безразмерные величины. В частности, если взять $L = 100\text{м}$, расчетный интервал времени $(0; 6]$ окажется в реальности $(0; 1,73\text{с}]$, длина трещины $2d=20\text{м}$, в эпицентре $O(0; 0)$ максимальная по абсолютной величине скорость v_1 составит $62,28\text{м/с}$, а напряжение $\sigma_{22}=7,66\text{МН/м}^2$. Если взять $L = 100\text{км}$, то расчетный интервал времени $(0; 28,83\text{мин}]$, длина трещины $2d=20\text{км}$. А в эпицентре максимальная по абсолютной величине скорость v_1 и напряжение σ_{22} не изменятся ($v_1 = 62,28 \text{ м/с}$, $\sigma_{22}=7,66\text{МН/м}^2$).

Аналогичные исследования проведены в диссертации при сбросе горизонтальных напряжений на трещины (модель трещины сдвига).

Во второй главе целью исследования напряженно - деформированного состояния поверхностного сооружения при сейсмических воздействиях, обусловленные сбросом тектонических напряжений на глубинных трещинах в земной коре при землетрясениях, на основе того же метода решена модельная задача динамики упругого прямоугольного тела, расположенного на упругом полупространстве, при дифракции упругих волн (рис. 7).

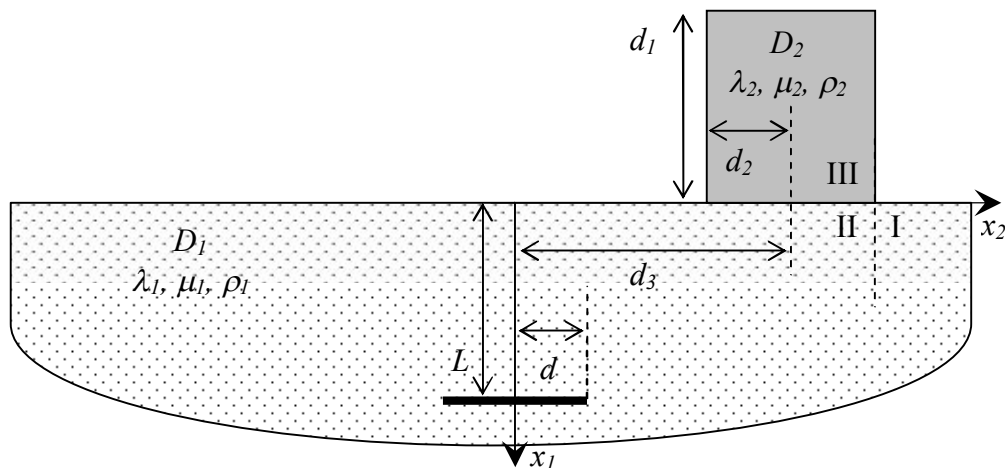


Рис.7. Упругая полуплоскость с поверхностным включением.

В начальный момент времени k -ая среда находится в состоянии покоя

$$\mathbf{u}^{(k)} = 0, \quad \dot{\mathbf{u}}^{(k)} = 0 \quad (k = 1, 2), \quad (12)$$

при свободных от действующих нагрузок на границе полупространства и включения:

$$\sigma^{(1)}_{1j}=0 \quad (j=1,2), \text{ при } x_1 = 0, |x_2 - d_3| > d_2, \quad (13)$$

$$\sigma^{(2)}_{1j}=0 \quad (j=1,2), \text{ при } x_1 = -d_1, |x_2 - d_3| \leq d_2, \quad (14)$$

$$\sigma^{(2)}_{2j}=0 \quad (j=1,2), \text{ при } |x_2 - d_3| = d_2, 0 \leq x_1 \leq d_1 \quad (15)$$

(Верхний индекс, в скобках, указывает номер среды). А условия на контактной границе отвечают требованиям полного сцепления (жесткий контакт):

$$v^{(1)}_i = v^{(2)}_i, \quad \sigma^{(1)}_{ij} = \sigma^{(2)}_{ij} \quad (i, j=1,2), \text{ при } x_1 = 0, |x_2 - d_3| \leq d_1. \quad (16)$$

Разработан алгоритм и пакет программ на языке DELPHI решения этой задачи. Принята явная разностная схема решения уравнений для составных упругих сред, построенная на основе метода бихарактеристик с привлечением идеи расщепления по пространственным координатам. Получены разрешающие разностные уравнения для внутренних, граничных, угловых и контактных точек прямоугольника.

Проведены компьютерные эксперименты, результаты которых представлены в виде осциллограмм скоростей и напряжений в поверхностном включении, дифракционные картины векторных полей скоростей, характеризующих процессы преломления и дифракции сейсмических волн в поверхностном упругом включении.

Дифракция преломленных волн при сбросе вертикальных напряжений на трещине. Расчет произведен для грунта (D_1) и бетона (D_2) при следующих безразмерных значениях исходных данных: $\rho^{(1)}=1$, $c_1^{(1)}=0,964$, $c_2^{(1)}=0,557$, $\rho^{(2)}=1$, $c_1^{(2)}=1$, $c_2^{(2)}=0,612$, $\tau=0,025$, $h=0,05$, $d_1=1$, $d_2=0,5$, $L=4,8$, $d=0,45$, расстояние от эпицентра d_3 варьируется: $d_3=0$ и $d_3=5$.

На рис.8 - 9 представлены векторные поля скоростей точек тела D_2 в разные моменты времени. Когда преломленная волна только добежала до верхнего торца, за продольной волной начинается образование слабых поперечных волн, и можно заметить эффект взаимодействия с боковой поверхностью. Дифракционная картина симметрична относительно вертикальной оси для тела в эпицентре и ассиметрична, если оно расположено вдали от него. В этом случае отчетливо проявляется формирование вихревых зон в сооружении и значительные сдвиговые деформации, параллельные дневной поверхности. Дифракционные картинки наглядно демонстрируют изменение формы сооружения по периметру, появление изгибных волн, разрушительных для наземных сооружений.

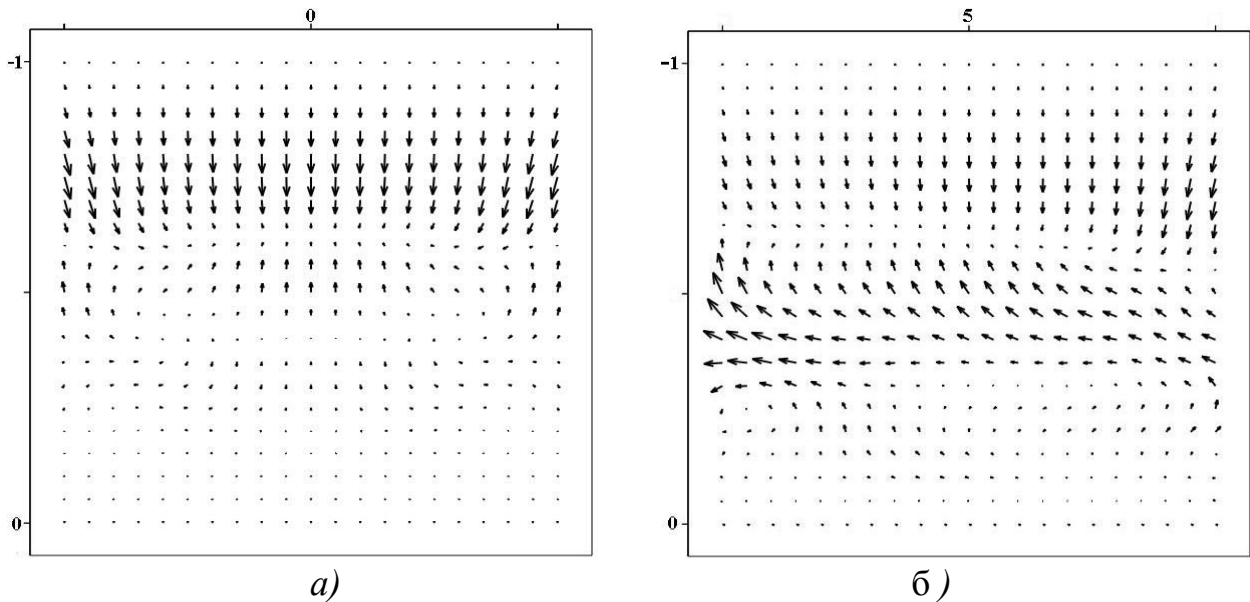


Рис.8. Векторное поле скоростей в D_2 до отражения преломленных волн от верхнего торца: а) $d_3=0, t=6$ и б) $d_3=5, t=7,75$.

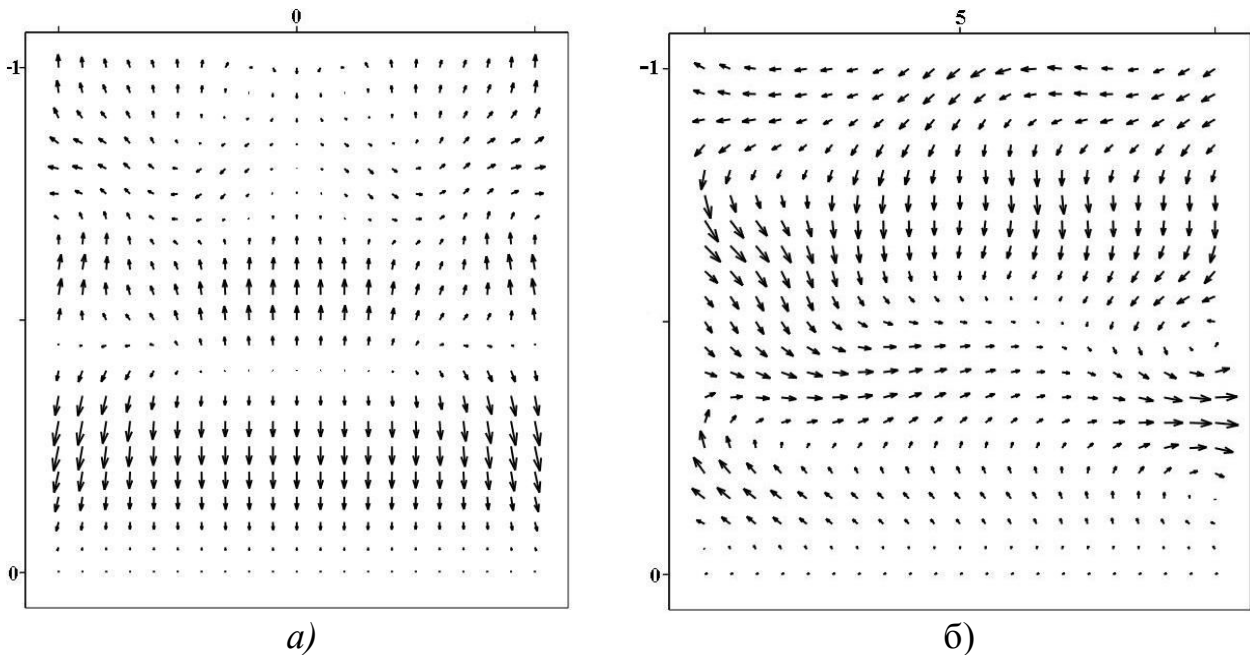


Рис.9. Векторное поле скоростей в D_2 при отражении, преломленных волн от верхнего торца: а) $d_3=0, t=7$ и б) $d_3=5, t=8,75$

На рис.10 - 11, представлены изолинии первого и второго инвариантов тензора напряжений, которые характеризуют распределение давления и интенсивность касательных напряжений в исследуемом теле. Эти инварианты также характеризуют объемные и сдвиговые деформации в теле.

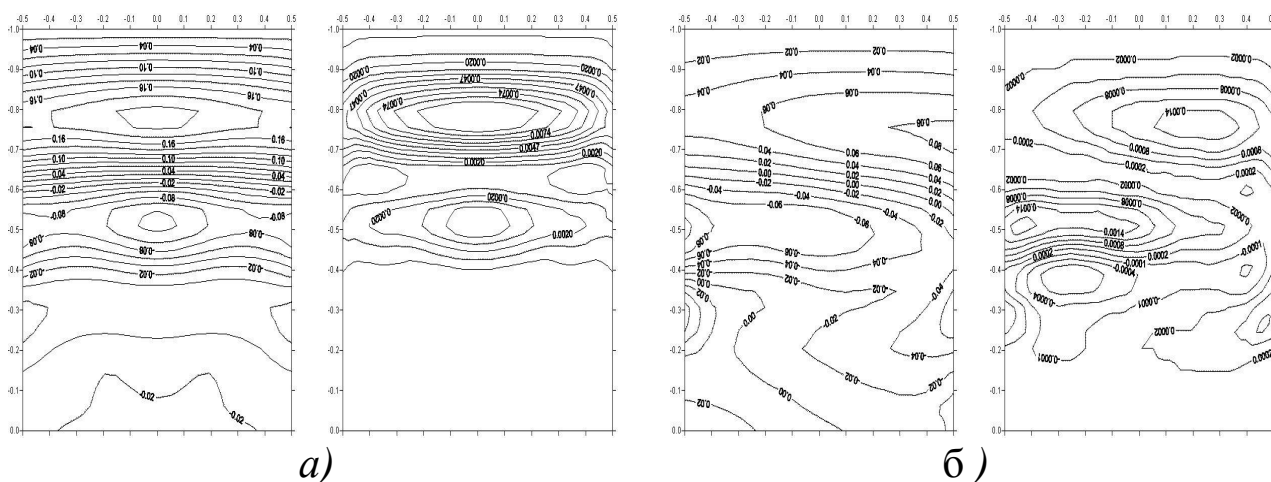


Рис.10. Изолинии первого и второго инвариантов тензора напряжения в D_2 до отражения преломленных волн от верхнего торца:
 а) $d_3=0, t=6$ и б) $d_3=5, t=7,75$.

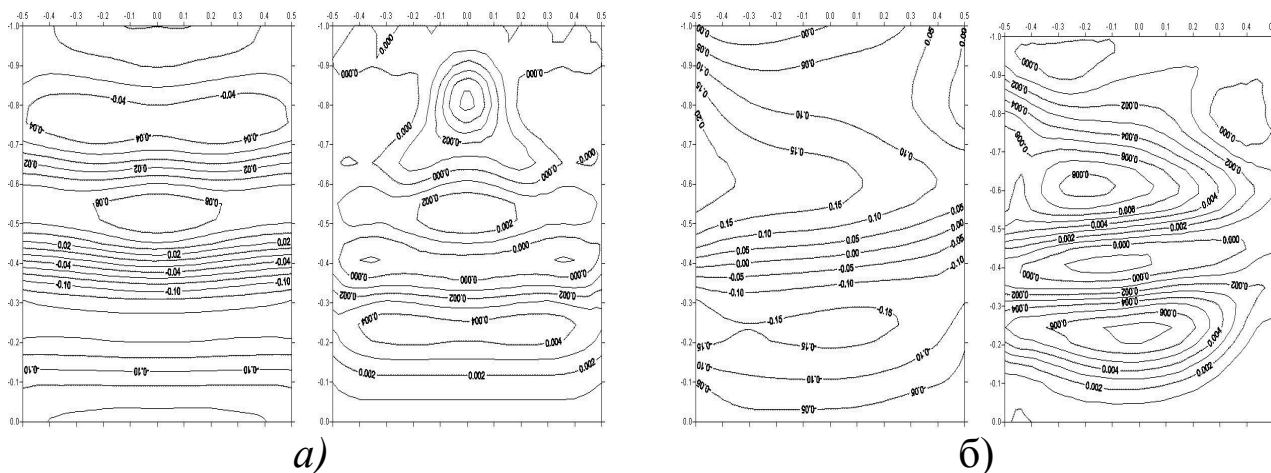


Рис.11. Изолинии первого и второго инвариантов напряжения тела D_2 , когда преломленные волны отразились от верхнего торца
 а) $d_3=0, t=7$ и б) $d_3=5, t=8,75$.

ВЫВОДЫ

Диссертация посвящена математическому моделированию динамического воздействия на наземные сооружения сейсмических волн, распространяющихся в земной коре при образовании глубинных трещин во время землетрясений. Для этого с использованием моделей и методов механики деформируемого твердого тела были решены следующие задачи:

- разработана математическая модель динамики упругого полупространства при дифракции упругих волн, порожденных сбросом напряжений на горизонтальной трещине в упругом полупространстве;

- на базе сочетания метода пространственных характеристик и метода расщепления разработаны алгоритм и пакет компьютерных программ на языке программирования DELPHI для расчета напряженно-деформированного состояния и поля скоростей упругого полупространства в широком диапазоне нестационарных внешних воздействий в условиях плоской деформации;
- на основе проведенных многовариантных компьютерных экспериментов исследованы напряженно-деформированное состояние и дифракционные картины полей скоростей в упругом полупространстве для разного типа волн, возникающих при сбросе вертикальных, либо горизонтальных напряжений на трещине, моделирующих сейсмические волны в земной коре при образовании трещин отрыва или сдвига;
- разработана математическая модель динамики прямоугольного упругого тела на упругом полупространстве в условиях жесткого контактного взаимодействия при дифракции и преломлении упругих волн, порожденных сбросом напряжений на горизонтальной трещине в упругом полупространстве;
- на базе сочетания метода пространственных характеристик и метода расщепления разработаны алгоритм и пакет компьютерных программ на языке программирования DELPHI для расчета напряженно-деформированного состояния и поля скоростей поверхностного упругого тела при падении и преломлении упругих волн, порождаемых сбросом напряжений на трещине в упругом полупространстве;
- на основе проведенных многовариантных компьютерных экспериментов исследованы напряженно-деформированное состояние и дифракционные картины полей скоростей в поверхностном упругом теле для разного типа волн, возникающих при сбросе вертикальных, либо горизонтальных напряжений на трещине;
- определено влияние сейсмического воздействия на состояние упругого тела в зависимости от его расстояния от эпицентра при образовании трещин отрыва или сдвига волн, моделирующего сейсмическое воздействие на наземное сооружение при землетрясениях;
- установлено явление концентрации динамических напряжений в окрестности особых точек упругого тела, дана оценка их значений в условиях решенных частных задач. Например, исследована

концентрация сжимающих напряжений в окрестности локального удара. Выявлено, что зоны, параллельная и примыкающая к боковым граням приложенного удара, испытывают знакопеременные напряжения, обусловленные сложной картиной волновых процессов. Эти эффекты могут привести к нарушению сплошности тела и к появлению откольных трещин.

Результаты диссертационной работы и разработанные пакеты программ могут найти применение при решении обширного круга задач теории упругости, в механике деформируемого твердого тела, механике горных пород, геофизике и сейсмологии, в механике композиционных материалов, а также в инженерной практике при расчете динамики и прочности наземных сооружений в зонах землетрясений и взрывных работ.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. **Сарсенов Б.Т.** Динамическое напряженное состояние полуполосы при боковом импульсном давлении [Текст]/ С.С.Джузбаев, Б.Т.Сарсенов // Математический журнал. - Алматы, 2003. - т.3, №1 (7), - с. 55-62.

2. **Сарсенов Б.Т.** Компьютерное моделирование волновых процессов в жестко закрепленном изотропном массиве [Текст]/ Б.Т.Сарсенов // Матер.научно-практ.конф. «Проблемы и перспективы внедрения кред.сист.образ. в РК». - Екибастуз, 2005. – с. 392-398.

3. **Сарсенов Б.Т.** Дифракция упругих волн в жестко закрепленном изотропном массива [Текст] / Б.Т.Сарсенов // Поиск, серия естест. и тех. наук. –Алматы, 2005. - №4. – с. 215-219.

4. **Сарсенов Б.Т.** Динамика упругой полуплоскости с поверхностным включением при нестационарном воздействии [Текст]/ Б.Т.Сарсенов // III Междунар. науч. конф. молодых ученых «Инновац. развитие и востреб. науки в современном Казахстане», - Алматы, 2009. -с.58-62.

5. **Сарсенов Б.Т.** Динамика упругой полуплоскости при нестационарном воздействии [Текст]/ Б.Т.Сарсенов // Матер. Межд. конф. «Теоретические и прикладные проблемы математики, механики и информатики». - Караганда, 2010. – с. 215-217.

6. **Сарсенов Б.Т.** Модель динамики среды в окрестности очага землетрясения [Текст]/ Л.А.Алексеева, Б.Т.Сарсенов // Сб. научн. трудов НИА РК. Методы экспер. физики. Алматы. 2010. – С. 63-73.

7. **Сарсенов Б.Т.** Моделирование динамики среды в окрестности очага землетрясения [Текст]/ Л.А.Алексеева, Б.Т.Сарсенов // Тезисы докладов Международного Джодасбековского симпозиума. Алматы. – 2011. – С. 139-140

8. **Сарсенов Б.Т.** Дифракция упругих волн в полуплоскости с упругим поверхностным включением [Текст]/ Л.А.Алексеева, Б.Т.Сарсенов// Тезисы докладов Междунар. конф. «Современные проблемы прикладной математики, механики», Новосибирск, 2011. – С. 102-102

9. **Сарсенов Б.Т.** Bicharacteristics method in nonstationary contact problems of the dynamics of elastic media [Текст]/ В.Sarsenov // The 4th congress of the turkic world mathematical society (TWMS), Baku (Azerbaijan), 2011. – P. 345-345

10. **Сарсенов Б.Т.** К модели сейсмического воздействия на наземные сооружения [Текст]/ Л.А.Алексеева, Б.Т.Сарсенов //Труды межд. науч. конф. «Современные проблемы механики сплошной среды», посвященной памяти акад. М.Я. Леонова (100-летие со дня рождения).– Бишкек, 2012.–С.219-223.

11. **Сарсенов Б.Т.** К моделированию сейсмодинамики наземных сооружений [Текст]/ Л.А.Алексеева, Б.Т.Сарсенов //Материалы межд. научно–практической конф. «Проблемы геомеханики и преподавания естественных дисциплин». –Алматы, 2012.–С.198-201.

12. **Сарсенов Б.Т.** Математическое моделирование динамики массива в окрестности очага землетрясения [Текст] / Б.Т.Сарсенов // Труды межд. науч. конф. «Современные проблемы механики сплошной среды», посвященной памяти акад. М.Я.Леонова.– Бишкек, 2012.–С.334-340.

13. **Сарсенов Б.Т.** Дифракция волн в упругой полуплоскости при сбросе напряжений на горизонтальной трещине [Текст] / Л.А.Алексеева, Б.Т.Сарсенов // Журнал эволюции открытых систем. Алматы, 2012.–№1.–С.12-22.

14. **Сарсенов Б.Т.** Дифракция нестационарных волн в упругой полуплоскости с поверхностным включением при сбросе напряжений на трещине [Текст] / Л.А.Алексеева, Б.Т.Сарсенов // Математический журнал. Алматы– 2012.– Т.12, № 2(44).–С.23-42.

15. **Сарсенов Б.Т.** Метод бихарактеристик в контактной задаче волновой динамики [Текст] / Б.Т.Сарсенов // Научный информац. журнал «Материаловедение», Бишкек, 2013, – №2, – С.101–104

16. **Сарсенов Б.Т.** О динамике наземного сооружения в эпицентре землетресения и вдали от него [Текст] / Т.Б.Дуйшеналиев, Б.Т.Сарсенов // Материалы X межд. науч. конф. «Актуальные проблемы современных наук - 2014». -Премзел (Польша), 2014. -Том 23. - С. 48-50.

17. **Сарсенов Б.Т.** Об одной математической модели динамики наземного сооружения [Текст] / Т.Б.Дуйшеналиев, Б.Т.Сарсенов // Уральский научный вестник. Серия Строительство и архитектура. Физика. Математика. № 24 (103). Урал, 2014. – С. 55-66

18. **Сарсенов Б.Т.** Моделирование динамики наземного сооружения при землетрясении [Текст] / Т.Б.Дуйшеналиев, Б.Т.Сарсенов. // Известия КГТУ им. И.Раззакова, Бишкек, 2014, – №32 (Часть II), – С.116–120

Сарсенов Бакытбек Темирбековичтин

01.02.04 – Деформациялануучу катуу нерселердин механикасы адистиги боюнча физика-математика илимдеринин кандидаты илимий даражасын алуу үчүн “Жер титирөө очогунун айланасындагы массив динамикасынын математикалык моделдери” аттуу темадагы диссертациялык ишинин

РЕЗЮМЕСИ

Негизги сөздөр: сейсмикалык толкундардын таралышы, жер титирөөнүн очогу, ачылбаган жер жаракасы, бимүнөздөмө ыкмасы, стационардык эмес байланышуу маселеси, айырмалык схема, сандык эксперименттер.

Изилдөөнүн объектиси. Жер титирөө очогунун айланасындагы тектүү массивдик динамиканы аныктоо үчүн моделдик тапшырмалар жана алардын жер алдындагы курулмаларга тийгизген таасирлери.

Иштин максаты. Серпилгич жарым мейкиндикте жайгашкан серпилгич нерселердин серпилгич толкундардын дифракциясы учурундагы динамикасынын математикалык моделдерин иштеп чыгуу. Коюлган тапшырмаларды сандык чыгаруунун алгоыргагын иштеп чыгуу жана анын негизинде колдонмо программалардын пакетин иштеп чыгуу. Көп вариациялуу сандык эксперименттерди жүргүзүү.

Изилдөөнүн ыкмалары. Математикалык моделдерди иштеп чыгуу үчүн бардык чөйрөдөгү кыймылдын дифференциалдык теңдемеси жана Гуктун мыйзамы пайдаланылат. Коюлган тапшырмаларды сандык чыгаруу үчүн ажыроо ыкмасын колдонуу менен мейкиндүүлүк мүнөздөмө берүү ыкмасы пайдаланылат.

Алынган жыйынтыктар жана алардын жаңычылдыгы:

– Чыңалуу менен бузулуу абалын жана серпилгич жарым беттүү ылдамдык талаасын жер жаракасындагы чыңалуулардын ыргытуусу менен жаралган серпилгич толкундардын дифракция учурундагы тик бурчтук менен өзүнчө жана байланышта эсептөөнүн математикалык модели иштелип чыкты.

– Иштелип чыккан ыкмалардын негизинде динамикалык тапшырмаларды чыгаруу үчүн DELPHI программалоо тилинде колдонмо программалардын пакети түзүлдү.

– Жер кыртышынын абалына жана үстүндөгү тик бурчтуу курулма-ларга сейсмикалык аракеттердин тийгизген даражасына баа берилди.

Сунуштамалар. Диссертациялык иштин жыйынтыктары тоо тектеринин механикасында, композициялык материалдардын механикасында, инженердик практикада, курулуштук долбоорлоо иштеринде, ошондой эле геофизикада жана сейсмологияда түздөн-түз колдонулушу мүмкүн.

РЕЗЮМЕ

диссертации Сарсенова Бакытбека Темирбековича на тему: «Математические модели динамики массива в окрестности очага землетресения» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Ключевые слова: распространение сейсмических волн, очаг землетресения, нераскрывающаяся трещина, метод бихарактеристик, нестационарная контактная задача, разностная схема, численные эксперименты.

Объект исследования. Модельная задача для определения динамики породного массива в окрестности очага землетресения и их воздействия на наземные сооружения

Цель работы. Разработка математической модели динамики упругого тела, расположенного на упругом полупространстве, при дифракции упругих волн. Разработать алгоритм численного решения поставленной задачи, и на его основе разработать пакет прикладных программ. Произвести многовариационные численные эксперименты.

Методы исследования. Для разработки математической модели используются дифференциальные уравнения движения сплошной среды и закон Гука. Для численного решения поставленной задачи используется метод пространственных характеристик с применением метода расщепления.

Полученные результаты и их новизна:

– Разработана математическая модель расчета напряженно-деформированного состояния и поля скоростей упругой полуплоскости отдельно и в контакте с прямоугольником при дифракции упругих волн, порожденных сбросом напряжений на трещине.

– На основе разработанных методов составлен пакет прикладных программ на языке программирования DELPHI для решения динамических задач.

– Сделана оценка степени влияния сейсмического воздействия на состояние земной коры и прямоугольных наземных сооружений.

Рекомендации. Результаты диссертационной работы могут найти непосредственное применение при теоретических и расчетных исследованиях в механике горных пород, в механике композиционных материалов, в инженерной практике, в строительных проектных работах, а также геофизики и сейсмологии.

SUMMARY

of the dissertation of Sarsenov Bakhitbek Temirbekovich on theme “Mathematical models of the dynamics of the massifs in the vicinity of the hearth earthquake” for the degree of candidate of physical and mathematical sciences on specialty 01.02.04 – mechanics of deformable solid

Keywords: diffraction of seismic waves, vicinity of the earthquake, depth crack, contact problems, method of bicharacteristics, numerical solution.

The object of the study. Dynamics of a rock mass in the vicinity of the earthquake, formation of surface seismic waves and determination of their effects on terrestrial plants by use of methods of elasticity theory.

The aim of this work. Development of a mathematical model of diffraction of seismic waves in an elastic half-space with a surface inclusion. Development of numerical algorithm for solving the problem, and on this basis to elaborate a software package. Producing many variant numerical experiments for investigation seismic processes by earthquakes.

Methods of research. To develop a mathematical model the differential equations of motion of elastic medium and Hooke's law have been used. For the numerical solution the method of spatial characteristics with the splitting method were elaborated.

The results of the work:

– Based on the combination of the method of spatial characteristics and the method of splitting a mathematical model has been elaborated for determination of the stress-strain state and the velocity field of an elastic half space separately and in contact with a rectangular surface elastic inclusion by the diffraction and refraction of elastic waves generated by the discharge of stress on depth crack.

– Based on the developed mathematical models compiled software package is created on programming language DELPHI for solving the dynamic problems in a wide range of time-dependent external seismic influences.

– The assessment of the degree of influence of seismic impact on the Earth's crust and surface facilities in the vicinity of the earthquake is given.

Application area. The results of the thesis may be applicable in elasticity theory, geophysics, seismology, rock mechanics, mechanics of composite materials.

САРСЕНОВ БАКЫТБЕК ТЕМИРБЕКОВИЧ

**Математические модели динамики массива
в окрестности очага землетресения**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать: 20.04.2015 г.

Объем: 1 п.л.
Формат 60x90 1/16.

Заказ № 22
Тираж 200 шт
