

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 539.3

КРУПОДЕРОВ

Андрей Валентинович

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ГЕОМЕХАНИКИ НА ОСНОВЕ
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ МЕХАНИКИ СПЛОШНЫХ
СРЕД**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Минск, 2010

Работа выполнена в Белорусском государственном университете (БГУ)

- Научный руководитель – Журавков Михаил Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, первый проректор, Белорусский государственный университет
- Официальные оппоненты: Босаков Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительная механика» Белорусского национального технического университета;
- Старовойтов Эдуард Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительная механика» Белорусского государственного университета транспорта
- Оппонирующая организация – Белорусский государственный технологический университет

Защита состоится 24 декабря 2010 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.07 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, 1-й корпус, ауд. 202, тел. ученого секретаря 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2010 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.05.07,
кандидат физико-математических наук,
доцент

_____ Нифагин В.А.

© Круподеров А.В., 2010
© БНТУ, 2010

ВВЕДЕНИЕ

В связи с возрастающей ролью горнодобывающей промышленности, расширением масштабов освоения подземного пространства и в целом интенсификацией техногенного воздействия на породную толщу разработка новых и развитие существующих методов и технологий решения задач геомеханики становится все более актуальной. В настоящее время основным подходом к решению большинства фундаментальных и прикладных задач геомеханики является математическое и компьютерное моделирование.

Изучение механических процессов и явлений, происходящих в породных массивах вследствие причин естественного характера и техногенного воздействия на них, составляет отдельное и весьма широкое направление исследований в современной механике и в частности механике сплошных сред и деформируемых твердых тел (МДТТ). К настоящему времени в данной области проведено большое количество исследований. Однако, в силу особых свойств объекта исследований – породного массива, разработка механико-математических моделей в рамках подходов и теорий МДТТ требует выполнения специальных исследований практически для каждой отдельной проблемы и задачи геомеханики. Следует подчеркнуть, что получение решений новых задач геомеханики имеет важное как теоретическое, так и прикладное значение. Таким образом, построение новых решений важных задач геомеханики, рассмотренных в данной диссертационной работе, *является актуальным с точки зрения развития методов и подходов МДТТ для решения задач современной геомеханики*. Подчеркнем, что задачи геомеханики в рамках исследований, изложенных в диссертационной работе, рассматриваются как задачи МДТТ.

С прикладной точки зрения актуальность диссертационной работы направлена на совершенствование и развитие прикладных методик расчета и прогнозирования сдвижений и деформаций земной поверхности в районе ведения подземных горных работ; развитие и совершенствование компьютерных технологий для исследования процессов образования и развития в породном массиве зон, находящихся в различном структурном состоянии, вследствие развития подземных горных работ; разработку компьютерных технологий для изучения определенных типов сопряженных гидрогеомеханических процессов. Разработанные новые прикладные методики для определения изменений напряженно-деформируемого состояния (НДС) породного массива с подземными сооружениями, вызванных произвольной поверхностной нагрузкой, могут быть использованы в строительной механике, механике грунтов, горных пород и массивов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами. Исследования диссертационной работы выполнялись по заданию 2.24. «Разработка методов и подходов для изучения напряженно-деформируемого состояния, прочности и устойчивости системы «Массив горных пород – горно-шахтное оборудование» и создание методик компьютерного анализа и программ для их исследования и оценки», в рамках ГКПНИ «Механика». № ГР20061793, научный руко-

водитель – д-р физ.-мат. наук Журавков М.А., организация-исполнитель – Белгосуниверситет.

Кроме того, исследования выполнялись в рамках таких крупных прикладных научных тем, как «Провести исследования и предложить модели, описывающие гидрогеомеханическое состояние массивов горных пород шахтного поля 4 РУ», договор № 084/21, № ГР20061273. Руководитель М.А. Журавков, БГУ, 2006; «Разработать специализированные компьютерные модели и выполнить исследование геомеханического состояния породной толщи с подземной камерой выщелачивания при использовании различных технологических схем», договор № 01/044, № ГР20082901. Руководитель М.А. Журавков, БГУ, 2008; «Развитие функциональности, разработка новых специализированных подсистем и модулей автоматизированной региональной системы геомеханического мониторинга Старобинского месторождения калийных солей для условий всех рудоуправлений РУП ПО «Беларуськалий», договор № 21885, № ГР20062131. Руководитель М.А. Журавков, БГУ, 2008; «Разработать модели и выполнить исследования распространения и поведения макротрещин в подработанных массивах горных пород с точки зрения образования техногенных водопроводящих трещин», договор № 21958, № ГР20081179. Руководитель М.А. Журавков, БГУ, 2009.

Цель и задачи исследования. Основная цель исследований диссертационной работы – на основе методов, подходов и теорий МДГТ и используя аппарат МДГТ, математического и компьютерного моделирования, в частности фундаментальные решения теории упругости, разработать эффективные методики и технологии для решения таких актуальных классов теоретических и прикладных задач геомеханики, как изучение НДС породного массива вследствие действия на него поверхностной (поверхностные сооружения) и подземной нагрузок (подземные выработки); исследование сопряженных гидрогеомеханических процессов, вызванных ведением подземных горных работ; построение решений модельных задач о действии динамических нагрузок импульсного характера в массивах горных пород с подземными сооружениями.

В соответствии с основной целью исследований в диссертационной работе решены следующие крупные задачи:

- 1) на основе фундаментальных решений теории упругости построены решения для определения НДС породной толщи с подземными выработками в приближении ее как упругим изотропным, так и трансверсально-изотропным полупространством при действии на его поверхности нагрузки произвольного вида;
- 2) на основе фундаментальных решений теории упругости построены решения для исследования изменений НДС на поверхности и в приповерхностных областях породной толщи, обусловленных наличием и развитием подземных горных сооружений (выработок);
- 3) на основе фундаментальных решений динамической теории упругости построены решения для некоторых типов модельных задач об изучении НДС в массивах горных пород с подземными сооружениями при воздействии на массив динамических нагрузок импульсного характера;

4) разработаны методики для расчета и построения в массиве горных пород с подземными сооружениями областей, находящихся в различном структурном состоянии, вследствие развития деформационных процессов, обусловленных ведением подземных горных работ, определение НДС по всей толще массива горных пород (от глубин расположения подземных выработок до земной поверхности);

5) на основе методов механики сплошных сред с учетом взаимовлияния НДС жидкой и твердой фаз построены решения для некоторых задач исследования сопряженных гидрогеомеханических процессов в породном массиве с подземными сооружениями в приближении последнего двухфазной средой.

Для решения всех перечисленных классов задач разработаны специализированные компьютерные модули.

Объектом исследования является породный массив, подверженный различного рода техногенным воздействиям, рассматриваемый как объект механики деформируемого твердого тела.

Предмет исследования – напряженно-деформированное состояние массивов горных пород с подземными сооружениями.

Положения, выносимые на защиту. Новыми результатами, выносимыми на защиту, являются:

1) решения, технологии и компьютерная методика для определения компонент напряженно-деформированного состояния породного массива в приближении его упругим изотропным полупространством и трансверсально-изотропным упругим многослойным полупространством при действии на его поверхности нагрузки произвольного вида, базирующиеся на основе фундаментальных решений теории упругости и позволяющие в отличие от существующих методов и подходов к решению подобного класса задач с наперед заданной точностью рассчитывать компоненты напряженно-деформированного состояния массива в приповерхностной области, а также учитывать неоднородность и анизотропию породного массива;

2) решения, технологии и компьютерная методика для расчета и прогнозирования деформаций и перемещений дневной поверхности породного массива вследствие ведения подземных горных работ, базирующиеся на основе фундаментальных решений теории упругости и позволяющие в отличие от существующих эмпирических методик рассчитывать компоненты напряженно-деформированного состояния массива на поверхности и в приповерхностной толще в различных, в том числе и новых, областях породного массива;

3) решения на основе фундаментальных решений динамической теории упругости модельных задач об изучении напряженно-деформированного состояния в массивах горных пород с подземными сооружениями при воздействии на массив динамических нагрузок импульсного характера, имеющих важное прикладное значение, в том числе новые решения о действии сосредоточенных импульсных нагрузок в пространстве со сферической полостью и плоскости с круговым отверстием;

4) алгоритмы и компьютерные методики, учитывающие различные типы обработки пластов, взаимное влияние твердой и жидкой фаз массива и позволяющие оперативно выполнять прогнозные оценки поведения подработанного массива только по имеющейся исходной информации, для выделения в массивах горных пород с подземными сооружениями зон, находящихся в различном структурном состоянии, вследствие развития деформационных процессов, обусловленных ведением подземных горных работ; определения НДС по всей толще массива горных пород (от глубин расположения подземных выработок до земной поверхности); для исследования сопряженных взаимовлияющих гидрогеомеханических процессов, вызванных развитием подземных горных работ.

Личный вклад соискателя. Представленные в работе новые научные результаты получены автором лично. Научный руководитель М.А. Журавков принимал участие в постановке задач и обсуждении полученных результатов. В разработке алгоритмов компьютерных методик, изложенных в диссертационной работе, принимал участие также О.Л. Коновалов. Результаты, принадлежащие соавторам совместных научных исследований, не вошли в данную диссертационную работу.

Апробация результатов диссертации. Материалы диссертации докладывались на следующих международных и республиканских научных конференциях: XIII ISM Congress (Будапешт, Венгрия, 2007), Всероссийская конференция молодых ученых «Неравновесные процессы в сплошных средах» (Пермь, Россия, 2007), Международная научная конференция «10-я Белорусская математическая конференция» (Минск, 2008), Международная научно-техническая конференция «Проблемы рационального природопользования» (Пермь, Россия, 2008), 40-й Республиканский научно-методический семинар «Применение методов компьютерной механики в инженерии, науке, образовании» (Минск, 2009), Международный форум-конкурс молодых ученых «Проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, Россия, 2009), Международная научно-практическая конференция «Геомеханика. Подземное строительство» (Тула, Россия, 2009), XVIII International Symposium of Mine Planning and Equipment Selection (Alberta, Canada, 2009), 2-я Международная научно-техническая конференция «Горная геология, геомеханика и маркшейдерия», (Донецк, Украина, 2009), Международный форум-конкурс молодых ученых «Проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, Россия, 2010), IV International Geomechanics Conference “Theory and practice of geomechanics for effectiveness the mining production and construction” (Varna, Bulgaria, 2010), Международная научная конференция «Прикладные задачи математики и механики» (Севастополь, Украина, 2010), VI Международный симпозиум по трибофатике (Минск, Беларусь, 2010).

Опубликованность результатов. Основные положения диссертации опубликованы в 29 работах, в том числе 8 статей в научных журналах согласно перечню ВАК (50 страниц, 1,88 авторского листа) и 4 статьи в журналах, не входящих в данный перечень, 1 монография, 12 статей в материалах конференций, 4 тезиса докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав основного текста, заключения, списка использованных источников и приложений. Она изложена на 127 страницах, из которых 116

страниц содержат основной текст с рисунками, 11 страниц – список литературных источников. Диссертация включает 3 приложения на 21 странице.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен обзор литературных источников по методам исследования НДС массивов горных пород, методам исследования процессов оседания земной поверхности вследствие ведения горных работ, методам решения задач о распространении упругих волн деформации в твердых средах, а также по фундаментальным решениям теории упругости как одному из главных методов, применявшихся при решении диссертационных задач. Показано, что выполненные в диссертационной работе исследования являются актуальными и оригинальными.

Вторая глава посвящена использованию статических фундаментальных решений теории упругости для решения различных классов задач геомеханики. В соответствии с рассматриваемыми задачами в главе можно выделить три части.

В части первой на основе фундаментальных решений Буссинеска и Черутти построена методика аналитического определения компонент НДС породного массива вследствие действия на его поверхности нагрузки произвольного вида.

Следует подчеркнуть, что расчет напряжений на поверхности полупространства, вызванных поверхностной нагрузкой, путем численного интегрирования является весьма затруднительным. Это обусловлено особенностью компонент фундаментальных решений при $z = 0$.

Предложенная в данной части методика базируется на разработанной процедуре построения аналитического решения модельной задачи об определении НДС упругого изотропного полупространства в случае действия на его поверхности кусочно-однородной нагрузки, распределенной по многоугольной области в произвольной точке $M(x, y, z)$ при $z \geq 0$.

Общая схема решения задачи, для случая нагрузки, равномерно распределенной по треугольной области представлена на рисунке 1.

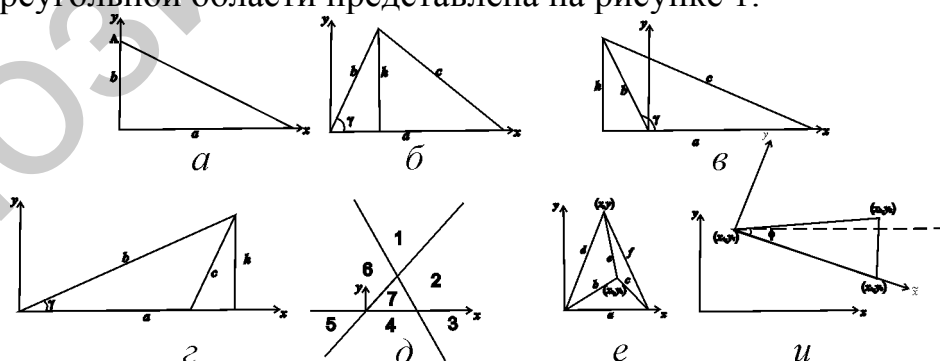


Рисунок 1 – Общая схема к решению модельной задачи

Технология построения общего решения основана на методе суперпозиции. Вначале, используя компоненты решений Буссинеска и Черутти, определяются компоненты НДС, вызванные действием однородной нагрузки, распределенной по площади прямоугольного треугольника, на вертикальной прямой, проходящей через точку А (см. рисунок 1, а).

$$F_{0x}(a, b, z) = \int_0^b \int_0^{a-a/bx} \tau_x f_x(-x, a-y, z) dy dx, \quad F_{0y}(a, b, z) = \int_0^b \int_0^{a-a/bx} \tau_y f_y(-x, a-y, z) dy dx,$$

$$F_{0z}(a, b, z) = \int_0^b \int_0^{a-a/bx} p f_z(-x, a-y, z) dy dx,$$

где F_{0i} – вызванная нагрузкой вдоль i -й оси соответствующая компонента НДС, f_{0i} – соответствующая ей компонента фундаментального решения.

Далее определяются компоненты в «верхней» вершине произвольного треугольника (рисунки 1, б–г). После этого определяются компоненты НДС от нагрузки, приложенной по треугольнику, в любой точке (рисунки 1, д–е). Далее определяются компоненты НДС от нагрузки, распределенной по произвольно расположенному треугольнику. Следующим шагом является построение процедуры определения НДС в полупространстве от воздействия произвольной нагрузки, распределенной по произвольной области.

В соответствии с этим методика решения исходной задачи выглядит следующим образом. Область действия нагрузки интерполируется триангуляционной поверхностью. Нагрузка, действующая в пределах каждого треугольника, аппроксимируется однородной нагрузкой с величиной исходной нагрузки в точке, совпадающей с центром данного треугольника. Следует отметить, что при разбиении области необходимо учитывать, что в местах с большими градиентами нагрузки требуется более мелкое разбиение. Результирующее НДС в исследуемой точке полупространства получается как суперпозиция всех НДС в данной точке от нагрузок, действующих по каждому из треугольников.

В качестве примера эффективности предложенного алгоритма можно привести решение задачи о воздействии на полупространство нагрузки, область действия которой представляет собой эллипс. Интенсивность нагрузки описывается выражением вида $p(x, y) = p_0 \sqrt{1 - x^2/a^2 - y^2/b^2}$. Для напряжений σ_{xx}, σ_{yy} на координатных осях Ox и Oy внутри области приложения нагрузки (в данном случае внутри эллипса), а также для напряжения σ_{zz} на оси Oz можно получить точные решения (см., например, Johnson, K.L. Contact Mechanics/ K.L. Johnson. – Cambridge University Press, 1985. – 438 p.).

Результаты вычислений приведены на рисунке 2, где сплошные линии – полученное решение, пунктирные линии – известные точные решения для соответствующих подобластей полупространства. Результаты расчетов приведены для случая, когда соотношение полуосей эллипса b/a равно 0,5. Анализ графиков на рисунке 2 показывает практически полное соответствие полученного решения с известным точным решением. Следует отметить, что наибольшая погрешность в данном случае не превышает 4,5 % и может быть уменьшена за счет увеличения плотности треугольников в расчетной области.

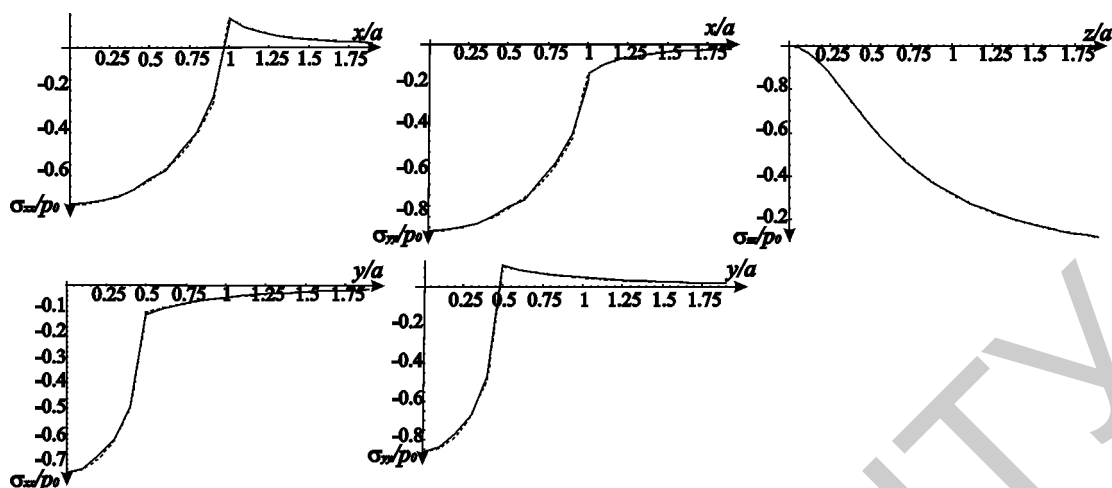


Рисунок 2 – Графики безразмерных напряжений на осях координат

Во второй части главы 2 описывается подход к построению аналитических решений и на их базе разработка методики расчета основных характеристик процесса деформаций и перемещений граничной поверхности породного массива вследствие наличия в нем подземных сооружений (выработок). Теоретической основой методики является использование фундаментальных решений теории упругости. Базовым положением при построении механико-математической модели рассматриваемого геомеханического процесса изучения перемещений и деформаций дневной поверхности породного массива в области ведения подземных работ является использование принципа Сен-Венана об эквивалентности влияния различных видов возмущений на НДС в областях деформируемого тела, находящихся на значительных расстояниях от источников возмущения. В соответствии с этим в основе разработки механико-математической модели лежит следующая гипотеза: задача о влиянии подземной полости на НДС в приповерхностных областях породного массива и его дневной поверхности эквивалентна модельной задаче о воздействии некоторой распределенной нагрузки, действующей в полупространстве, на НДС на ее границе и в приграничной области (рисунок 3).

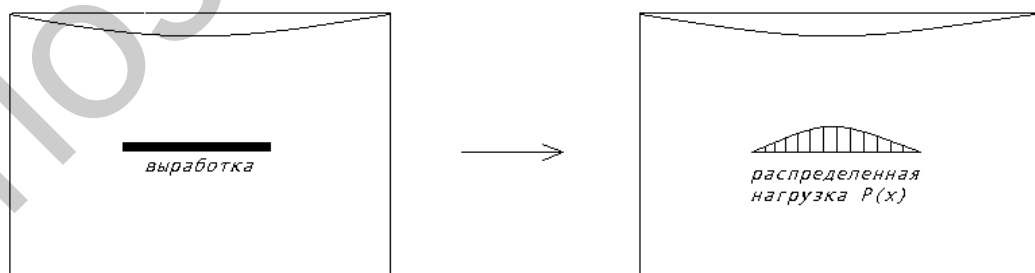


Рисунок 3 – Схема к построению модельной задачи

Разрешающие уравнения сформулированной модельной задачи строятся на основе использования фундаментальных решений теории упругости для полупространства: решение Миндлина и его аналог для трансверсально-изотропной среды. Используя указанные решения, можно построить аналитические решения для случая действия в полупространстве произвольных нагрузок, распределенных по областям произвольной формы. Применительно к рассматриваемому

классу прикладных задач достаточно рассмотреть нагрузку, распределенную по площадке, параллельной поверхности полупространства. В этом случае выражение для компонент перемещений, вызванных такой нагрузкой, записывается в следующем виде:

$$U_i(x, y, z) = \iint_S u_i(x - \xi, y - \eta) f(\xi, \eta) d\xi d\eta,$$

где через U_i обозначены компоненты перемещений, вызванные распределенной нагрузкой, а u_i – компоненты, являющиеся следствием воздействия сосредоточенной силой, $f(x, y)$ – плотность нагрузки, распределенной по площади S .

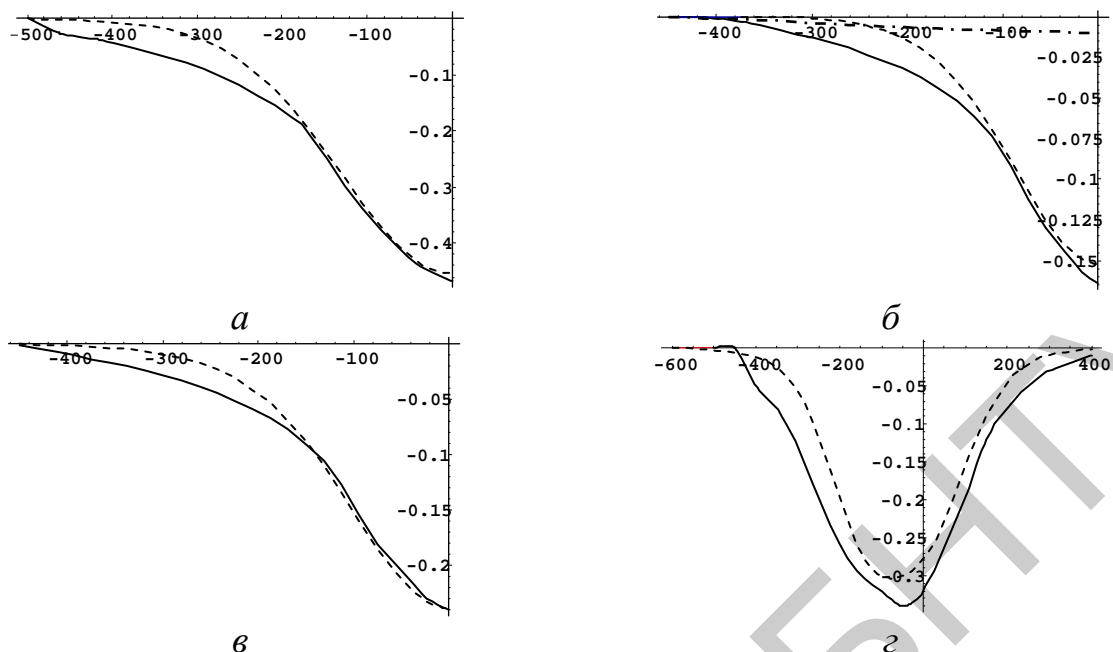
Алгоритм решения сформулированной модельной задачи выглядит следующим образом. На первом шаге по имеющейся информации о расположении подземных выработок определяется геометрия области, по которой будет прикладываться модельная нагрузка. Для каждого блока областью приложения нагрузки является вся горизонтальная полоса $S_k[-\infty, \infty] \times [y_c - l/2; y_c + l/2]$, где l – длина лавы, $y_c - y$ – координата центра лавы. Однако следует заметить, что в связи с быстрым убыванием функции плотности нагрузки на бесконечности, вместо интервала $[-\infty, \infty]$ достаточно взять конечный интервал $[x_c - M, x_c + M]$, где $x_c - x$ – координата центра лавы, а M – достаточно большое число. В итоге расчетная формула принимает такой вид:

$$U_i(x_i, y_j, 0) = \sum_{k=1}^n \iint_{S_k} u_i(x_i - \xi, y_j - \eta, 0) f_k|_{S_k}(\xi, \eta) d\xi d\eta,$$

где f_k – функция нагрузки для k -го блока.

Одним из значимых элементов в разрешающих интегральных уравнениях рассматриваемой модельной задачи является вид подынтегральной функции $f_k(x, y)$, определяющей модельную нагрузку, действующую в массиве и заменяющую влияние на породную толщу k -го блока. Для определения вида данной функции, а также для оценки точности и адекватности моделей, базирующихся на фундаментальных решениях для изотропной и трансверсально-изотропной сред, были выполнены специальные исследования, связанные с анализом данных натуральных исследований и проведением серий численных экспериментов. Интерпретация и анализ результатов натуральных исследований и компьютерного моделирования выполнялись на основе основных законов и положений механики деформируемого твердого тела.

На рисунке 4 приведены примеры кривых оседаний поверхности, построенных на основе предложенных аналитических выражений, базирующихся на фундаментальном решении для трансверсально-изотропной среды и на базе инженерной прикладной методики, в основу которой положена обработка данных натуральных экспериментов. Помимо этого, на рисунке 4, б изображена кривая оседаний, построенная по аналитическим выражениям с фундаментальным решением Миндлина для изотропной среды (пунктир с точкой).



a – $D = 265$ м, $H = 830$ м, *б* – $D = 120$ м, $H = 680$ м, *в* – $D = 170$ м, $H = 750$ м, *г* – отработка двух блоков ($D1 = 170$ м, $H1 = 750$ м, $D2 = 110$ м, $H2 = 630$ м); D – ширина лавы, H – глубина ведения горных работ

Рисунок 4 – Мульды оседаний при различных параметрах разработки

В третьей части второй главы описывается подход к изучению объемного НДС многослойного трансверсально-изотропного полупространства в случае воздействия на полупространство нормальной нагрузки, распределенной по произвольной площади на его поверхности.

В силу того, что получаемые решения имеют довольно громоздкий вид, в качестве примера здесь приведена процедура построения полного решения для задачи определения НДС упругого трансверсально-изотропного слоя, покоящегося на жестком основании. Методика построения решения в общем случае описана в диссертационной работе.

Рассматривается бесконечный трансверсально-изотропный слой толщины h , находящийся на жестком основании. На слой действует нормальная нагрузка, распределенная по верхней границе слоя. Предполагаем, что массовые силы отсутствуют. Поведение слоя описывается уравнениями равновесия и соответствующими граничными условиями. Перемещения представляются в следующем виде:

если $s_1 \neq s_2$,

$$\begin{aligned} u &= \sum_{i=1}^2 \partial \varphi_i / \partial x + \partial \varphi_3 / \partial y \\ v &= \sum_{i=1}^2 \partial \varphi_i / \partial y - \partial \varphi_3 / \partial x \\ w &= \sum_{i=1}^2 \alpha_i \partial \varphi_i / \partial z_1 \end{aligned} \quad (1)$$

если $s_1 = s_2$,

$$\begin{aligned} u &= \partial \varphi_1 / \partial x + z_1 \partial \varphi_2 / \partial x + \partial \varphi_3 / \partial y, \\ v &= \partial \varphi_1 / \partial y + z_1 \partial \varphi_2 / \partial y - \partial \varphi_3 / \partial x, \\ w &= \alpha_1 (\partial \varphi_1 / \partial z_1 + z_1 \partial \varphi_2 / \partial z_1) - \alpha_3 \varphi_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где каждая из функций φ_i должна удовлетворять квазигармоническому уравнению $(\partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + (1/s_i^2) \partial^2 / \partial z^2) \varphi_i = 0$, ($i = 1, 2, 3$), а также системе соответ-

ствующих граничных условий. Величины s_i определяются через константы матрицы упругости c_{ij} .

Для решения сформулированной системы уравнений применяем преобразование Фурье по переменным x, y . В результате получаем следующие обыкновенные дифференциальные уравнения для трансформант функций $\varphi_i: d^2 \varphi_i^F / dz^2 = s_i^2 w^2 \varphi_i^F$, где $w^2 = w_1^2 + w_2^2$.

Общее решение этих уравнений записывается в следующем виде:

$$\varphi_i = C_{1i} e^{-s_i w} + C_{2i} e^{s_i w}. \quad (3)$$

Учитывая граничные условия, получаем систему линейных уравнений относительно C_{ji} . Решая данную систему, находим выражения для C_{ji} .

Таким образом, формулы (1)–(3) дают преобразованное по Фурье решение поставленной задачи. Обращая по Фурье компоненты перемещений, окончательно находим решение сформулированной задачи:

$$u = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u^F e^{-i(w_1 x + w_2 y)} dw_1 dw_2, \quad v = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} v^F e^{-i(w_1 x + w_2 y)} dw_1 dw_2,$$

$$w = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w^F e^{-i(w_1 x + w_2 y)} dw_1 dw_2.$$

Замечание: в случае воздействия единичной силы имеем: $q^F = 1$. Получаем фундаментальное решение указанной задачи.

Аналитическое вычисление этих интегралов является достаточно затруднительной процедурой, поэтому более эффективным представляется воспользоваться известными численными методами для получения решения при конкретных начальных параметрах.

Описанный подход распространен для общего случая многослойной среды. Формула (3) в данном случае приобретает следующий вид:

$$\varphi_i^j = C_{1i}^j e^{s_i w} + C_{2i}^j e^{-s_i w}.$$

Так как на бесконечности перемещения и напряжения стремятся к нулю, то можно положить $C_{1i}^n = 0$. Подставляя данные выражения в систему граничных условий и условий контакта слоев, получаем систему линейных уравнений относительно C_{hi}^j . В качестве примера рассмотрим задачу о воздействии однородной нагрузки, распределенной по единичному квадрату. Толщина слоя $h = 0.5$ м. Упругие свойства слоя (материал изотропен): $E = 10^{10}$ Па, $\nu = 0,2$. Упругие свойства полупространства: $E_1 = E_2 = 5$ ГПа, $\nu_1 = \nu_2 = 0,3$, $G_2 = 0,28462$ ГПа. Предполагаем условия жесткого контакта слоя и основания. На рисунке 5 представлены графики напряжений для $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xz}$ в плоскости xOz .

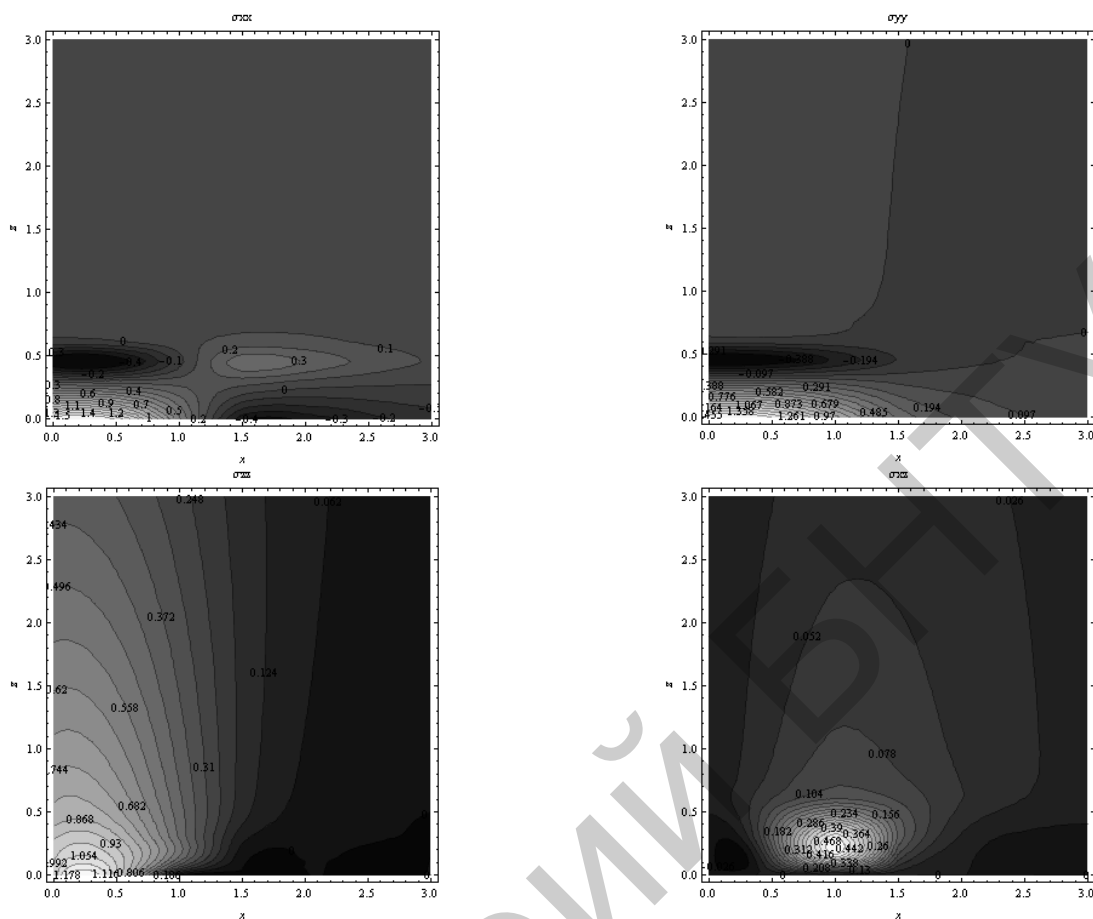


Рисунок 5 – Контурные графики напряжений

Третья глава. В данной главе приводится решение задач, связанных с изучением воздействия динамических нагрузок на области массивов горных пород с подземными сооружениями. Рассматривается решение модельных задач по определению возмущенного НДС в массиве горных пород с выработанным пространством в случае действия в массиве динамических нагрузок, имеющих импульсный характер.

Решения рассматриваемого в данной главе класса задач строятся на основе использования соответствующих фундаментальных решений теории упругости для динамических задач. В главе построены решения следующих модельных задач.

1. Определение НДС упругого слоя, находящегося на жестком полупространстве, при воздействии на слой поверхностных динамических нагрузок. На основе построенного решения выполнены исследования влияния характеристик импульсной нагрузки на НДС поверхностного слоя.

2. Исследование наведенных волн деформаций в упругом бесконечном пространстве со сферической полостью вследствие воздействия на граничную внутреннюю поверхность полости динамической нормально распределенной нагрузки.

3. Изучение воздействия волн деформаций на область упругого пространства со сферической полостью, наведенных действием массовых динамических распределенных сил (распределение зависит от радиальной координаты).

4. Исследование распространения волн деформаций в изотропном упругом пространстве/плоскости со сферической/круговой полостью, наведенных воздействием сосредоточенной динамической нагрузки, действующей в некоторой точке пространства/плоскости.

Замечание. Показано, что можно рассмотреть модельные задачи, аналогичные задачам 2 и 3, и в случае, когда вместо сферической полости рассматривается цилиндрическая бесконечная полость. Очевидно, что такие задачи сводятся к плоским задачам теории упругости.

В диссертации выполнена процедура построения полного решения указанных задач для пространства в случае, когда направление силы совпадает с радиус-вектором точки ее приложения, и для плоскости с круговым отверстием при произвольном направлении силы.

Решение модельной задачи № 4 представляется в виде суперпозиции решений двух задач. Первая задача – о воздействии сосредоточенной силы в неограниченном пространстве/плоскости. Следующая – о распространении граничных возмущений от сферической полости в неограниченном пространстве при отсутствии массовых сил со специальным видом граничных условий (граничные условия исходной задачи за вычетом компонент решений первой задачи на границе полости/отверстия).

Решение первой модельной задачи представляет собой динамический аналог решения Кельвина. Процедура построения решения сформулированной математической задачи основывается на разложении искомых функций в ряды по полиномам Лежандра и Гегенбауэра в случае пространства и по системе экспонент в случае плоскости и использовании преобразования Лапласа. В итоге для коэффициентов этих разложений получаются уравнения известного типа. Решая данные уравнения с учетом граничных условий, находим преобразованные по Лапласу коэффициенты рядов. Таким образом, преобразование Лапласа решения представляется в виде ряда Фурье по используемым функциям, коэффициенты которого представляют собой произведения коэффициентов нагрузки из граничных условий и некоторых функций.

Процедура получения решения выглядит следующим образом. Сначала находятся коэффициенты рядов Фурье функций из граничных условий. Далее производится обращение преобразования Лапласа коэффициентов при них в полученных рядах. В итоге, на основании свойств преобразования Лапласа, полное обращение производится с помощью вычисления сверток.

В качестве примера на рисунке 6 приведено сравнение результатов решения задачи в случае, когда функциональная зависимость от времени сосредоточенной силы, действующей в упругом изотропном пространстве, представляет собой форму треугольного импульса: $f(\tau) = 10^{12} (\tau_+ - 2(\tau - 1/2)_+ + (\tau - 1)_+)$. Точка приложения силы находится в массиве на расстоянии 10 радиусов от центра подземной полости. Поверхность сферы свободна от усилий. В качестве исходных данных были взяты величины, соответствующие массиву калийных солей:

радиус полости $R = 1 м$; упругие приведенные свойства массива $E = 10^{10} Па$, $\nu = 0,3$, плотность среды $\rho = 2200 кг/м^3$.

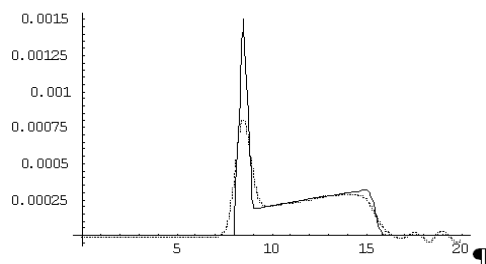


Рисунок 6 – Сравнение решения, построенного в диссертации, с численным решением

В главе 4 описываются все этапы разработанной, на основе конечно-элементного моделирования, методики для изучения НДС на поверхности и в приповерхностной толще породного массива, вызванных ведением подземных горных работ. Разработанная методика компьютерного моделирования базируется на системах разрешающих уравнений механики сплошных сред и позволяет исследовать процессы сдвижения земной поверхности, вычислять напряженное и деформированное состояния в глубине массива, в том числе поведение массива как двухфазной среды, учитывая наличие жидкой фракции. Методика адаптирована применительно к Старобинскому месторождению калийных солей.

Методика прогнозирования оседаний и деформаций земной поверхности, вызванных влиянием горных работ.

Теоретическим базисом построенной методики являются модели МДТТ. Так как изучаются деформационные процессы на дневной поверхности и в областях, находящихся на значительных расстояниях от мест непосредственного ведения горных работ, то породный массив в таких областях можно рассматривать как упругую сплошную среду. Поэтому в качестве базовой модели МДТТ выбиралась модель вязкоупругого поведения трансверсально-изотропного массива, отражающая основные качественные и количественные стороны процесса перемещений на дневной поверхности и в приповерхностных областях. Связь между компонентами напряжений и деформаций выражается следующим образом (аналог простейшей модели Кельвина): $s = E\varepsilon + 2D\dot{\varepsilon}$, $\dot{\varepsilon} = 0$.

Система разрешающих уравнений строилась для двумерных модельных задач. Данное обстоятельство определяется тем, что один из линейных горизонтальных размеров выработки (ее длина) для рассматриваемого типа выработанного пространства значительно больше другого горизонтального размера (ширины выработки), а также значительным сокращением в этом случае времени расчетов, что на этапе «калибровки» модели играет весьма важную роль. Построенная компьютерная модель обобщена на трехмерный случай.

На основании проведения серии численных экспериментов было установлено, что для рассматриваемого класса задач достаточным является выделение трех основных пачек слоев с различными физико-механическими параметрами

и дополнительно мощного «основания». Условно выделенные три основные пачки можно назвать как осадочный слой, глинисто-мергелистая толща, соляной слой. Породная толща, находящаяся ниже соляной пачки принимается как усредненная приведенная пачка слоев.

Отметим также, что для учета влияния обрушившихся пород вместо реальной мощности выработки используется эффективная мощность, равная величине действительной мощности, умноженной на некоторый коэффициент, меньший единицы. Введение данного коэффициента позволяет учесть обрушившиеся объемы породных масс в выработанное пространство без изменения вычислительного алгоритма решения задачи. Величина данного коэффициента рассчитывалась как результат обобщения решений многочисленных модельных задач с использованием данных натуральных замеров.

В соответствии со сформулированной граничной модельной задачей на базе конечно-элементного пакета **TOCHNOG** была создана численная модель и разработана технология решения соответствующей модельной компьютерной задачи.

Процедура вычислительного процесса содержит следующие основные этапы: вычисление НДС ненарушенного тяжелого массива; удаление элементов, моделирующих выработанное пространство и расчет НДС массива с выработкой; моделирование «схождения кровли и подошвы выработки вследствие формирования областей разрушения». Алгоритм реализации последнего этапа состоит в склейке узлов, расстояние между которыми при деформировании не превышает некоторой заданной величины (в нашем случае 5–10 см).

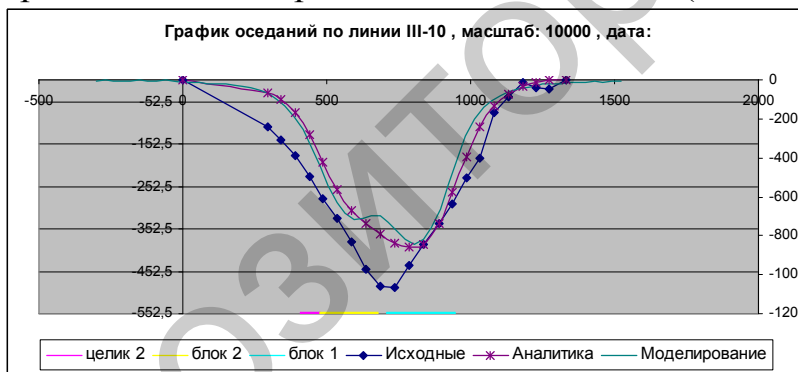


Рисунок 7 – Сравнение графиков оседаний, построенных на базе различных методик

построенными в соответствии с действующими методическими указаниями (инженерной методикой расчета сдвижений и оседаний поверхности).

Дальнейшее развитие разработанной методики для вычисления НДС в окрестности выработанного пространства.

Разработанная процедура расчета перемещений и деформаций на земной поверхности и в приповерхностных областях была разработана применительно к задачам анализа и прогнозирования геомеханического состояния массива в окрестности выработанного пространства и в зоне наведенной трещиноватости. Разработан алгоритм, учитывающий обрушение пород вокруг выработанного пространства. В данном случае, в отличие от предыдущего алгоритма, использует-

На рисунке 7 приведен пример сравнительного анализа расчетных кривых перемещений дневной поверхности (оседаний) с кривыми оседаний, полученными по данным натуральных измерений на конкретных реперных линиях, а также с графиками перемещений,

ся реальная выемочная мощность пласта. Процессы обрушения и формирования областей наведенной трещиноватости в алгоритме учитываются следующим образом: в местах формирования трещин модуль сдвига в вертикальном направлении устанавливается близким к нулю. Выделение областей обрушения и трещиноватости выполняется на основе критерия Кулона–Мора: $0,5(\sigma_1 - \sigma_3) + 0,5(\sigma_1 + \sigma_3)\sin\varphi - c \cos\varphi \leq 0$, где σ_1, σ_3 – соответственно максимальное и минимальное главные напряжения, c – сцепление породы, φ – угол внутреннего трения.

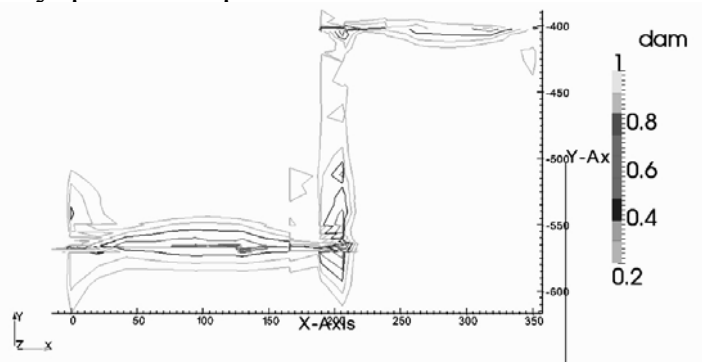


Рисунок 8 – Области нарушения в массиве горных пород после отработки лав № 6 и № 39

На рис. 8 приведены результаты построения областей нарушений в массиве как результат компьютерного моделирования в соответствии с разработанным алгоритмом. Расчеты выполнены для реальных условий отработки участка шахтного поля в условиях Старобинского месторождения калийных солей.

Разработка методики исследования сопряженных геомеханических и гидромеханических процессов.

На следующем шаге построенная модель, описывающая деформационные процессы в массиве горных пород, была развита далее применительно к решению задач прогнозирования сопряженных геомеханических и гидромеханических процессов.

Система разрешающих уравнений, описывающих связанные геомеханические и гидромеханические процессы, включает (отметим, что здесь рассматривается трехмерная модель):

– уравнения равновесия, в которых присутствуют слагаемые, учитывающие поровое давление жидкости:

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g = 0;$$

– уравнение фильтрации жидкости с учетом влияния напряженного состояния в массиве:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) - \alpha_p \left(\frac{\partial (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})}{\partial t} \right),$$

где $a = \frac{k(1 + \varepsilon)}{\gamma(a_v + \varepsilon\beta)}$, $\alpha_p = \frac{a_v}{a_v + \varepsilon\beta}$, ε – коэффициент пористости, β – коэффициент объемного сжатия жидкости, a_v – коэффициент уплотнения породы пласта

($\frac{d\varepsilon}{dt} = -a_v \frac{dp_{rock}}{dt}$), k – коэффициент фильтрации.

К данным уравнениям следует еще добавить граничные условия и начальное распределение давления.

Алгоритм для расчета НДС массива горных пород в этом случае тот же, что и для задач изучения и прогнозирования деформационных процессов в породной толще. Общий алгоритм выполнения гидрогеомеханических расчетов выглядит следующим образом.

1. Вычисляется НДС ненарушенного тяжелого массива. Гидромеханические процессы на данном этапе не рассматриваются.

2. Выполняется процедура удаления элементов, моделирующих выработанное пространство. На данном этапе гидромеханические процессы уже «включаются» в рассмотрение.

3. Проводятся гидромеханические расчеты, учитывающие реальное текущее напряженное состояние в массиве, до момента наступления в массиве установившегося равновесного состояния между напряженным состоянием и гидрогеологическим давлением.

На основании построенных моделей и алгоритмов, изложенных в данной главе, разработан программный комплекс, предназначенный для выполнения прикладных исследований по изучению деформационных и сопряженных гидрогеомеханических процессов в подработанном массиве горных пород, применительно к Старобинскому месторождению калийных солей и столбовой системе отработки продуктивных пластов. Комплекс позволяет:

- исследовать НДС подработанного массива от глубин ведения горных работ до дневной поверхности;

- отстраивать характерные зоны в подработанном массиве, в частности области трещиноватости вокруг выработанного пространства;

- изучать геофильтрационные процессы с учетом реального геомеханического состояния подработанного массива и его структурно-геологического состояния.

Разработаны макросы и приложения, предназначенные для формирования таблиц, содержащих данные о топологии и физико-механических параметрах исследуемого участка, и создания в автоматическом режиме сеток и входного файла для выполнения непосредственных расчетов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты. В диссертационной работе получены следующие новые научные результаты:

1) решения, технологии и компьютерная методика для определения компонент напряженно-деформированного состояния породного массива в приближении его упругим изотропным полупространством и трансверсально-изотропным упругим многослойным полупространством при действии на его поверхности нагрузки произвольного вида, базирующиеся на основе фундаментальных решений теории упругости и позволяющие в отличие от существующих методов и подходов к решению подобного класса задач с наперед заданной точностью рассчитывать компоненты напряженно-деформированного состоя-

ния массива в приповерхностной области, а также учитывать неоднородность и анизотропию породного массива [11, 24, 25];

2) решения, технологии и компьютерная методика для расчета и прогнозирования деформаций и перемещений дневной поверхности породного массива вследствие ведения подземных горных работ, позволяющие в отличие от существующих эмпирических методик рассчитывать компоненты напряженно-деформированного состояния массива на поверхности и в приповерхностной толще в различных, в том числе и новых, областях породного массива [1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, 14–17, 26, 28];

3) решение, на основе фундаментальных решений динамической теории упругости, модельных задач об изучении напряженно-деформированного состояния в массивах горных пород с подземными сооружениями при воздействии на массив динамических нагрузок импульсного характера, имеющих важное прикладное значение, в том числе получены новые аналитические решения о действии сосредоточенных импульсных нагрузок в пространстве со сферической полостью и плоскости с круговым отверстием [3, 6, 9, 12, 13, 19, 21, 27, 29];

4) алгоритмы и компьютерные методики, учитывающие различные типы отработки пластов, взаимное влияние твердой и жидкой фаз массива и позволяющие оперативно выполнять прогнозные оценки поведения подработанного массива только по имеющейся исходной информации, для выделения в массивах горных пород с подземными сооружениями зон, находящихся в различном структурном состоянии, вследствие развития деформационных процессов, обусловленных ведением подземных горных работ; определения НДС по всей толще массива горных пород (от глубин расположения подземных выработок до земной поверхности); для исследования сопряженных взаимовлияющих гидрогеомеханических процессов, вызванных развитием подземных горных работ [1, 18, 20, 22, 23];

Рекомендации по практическому использованию результатов диссертации. Результаты диссертационной работы могут быть использованы при создании и развитии прикладных методик расчета и прогнозирования НДС породной толщи в районе ведения подземных горных работ от глубин ведения горных работ до земной поверхности с учетом большого количества определяющих факторов (наличие поверхностной нагрузки произвольного вида, наличие подземных сооружений, учет неоднородности строения массива, учет сопряженных гидрогеомеханических процессов). Использование результатов исследований при выполнении прикладных научно-исследовательских и проектных работ позволяет сократить затраты на проведение натурных и экспериментальных исследований, проверить множество технических решений и выбрать лучшее.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в практике работы научно-исследовательских и проектных организаций геомеханического и горно-промышленного профилей.

Результаты исследований использованы при выполнении важных прикладных научно-исследовательских тем.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии

1. Компьютерное моделирование в геомеханике / М.А. Журавков, С.И. Богдан, О.Л. Коновалов, А.В. Круподеров, П.А. Прохоров. – Минск: БГУ, 2008. – 444 с.

Статьи в научных журналах

2. Журавков, М.А., Моделирование процессов деформирования земной поверхности и приповерхностной толщи на основе фундаментальных решений механики сплошных сред / М.А. Журавков, А.В. Круподеров // Горная механика. – 2007. – № 2. – С.42–54.

3. Журавков, М.А. Деформирование и разрушение массивов горных пород при воздействии волн деформаций и напряжений / М.А. Журавков, А.В. Круподеров, Ю.М. Плескачевский // Известия вузов. Горный журнал. – 2007. – № 6. – С.93–100.

4. Журавков, М.А. Методика компьютерного моделирования сдвижений земной поверхности от влияния подземных горных работ / М.А. Журавков, О.Л. Коновалов, А.В. Круподеров // Горная механика. – 2008. – № 1. – С. 3–11.

5. Журавков, М.А. Технологии компьютерного моделирования сдвижений земной поверхности / М.А. Журавков, О.Л. Коновалов, А.В. Круподеров // Маркшейдерский Вестник. – 2008. – № 4. – С. 31–37.

6. Прочность и разрушение деформируемых сред при воздействии динамических нагрузок / М.А. Журавков, Ю.М. Плескачевский, А.В. Круподеров, Н.Г. Чумак // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2008. – № 3 – С. 35–43.

7. Журавков, М.А. К задаче моделирования перемещений земной поверхности в регионе ведения крупномасштабных горных работ / М.А. Журавков, А.В. Круподеров // Вестник БГУ. Сер. 1. – 2008. – № 3. – С. 52–55.

8. Журавков, М.А. Прогнозирование сдвижений земной поверхности на основе компьютерного моделирования / М.А. Журавков, О.Л. Коновалов, А.В. Круподеров // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. Серия «Науки о Земле». – 2009. – Вып. 4. – С. 60–64.

9. Журавков, М.А. Решение задачи о динамическом воздействии сосредоточенной силы в упругом изотропном пространстве со сферической полостью / М.А. Журавков, А.В. Круподеров // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. Серия «Науки о Земле». – 2009. – Вып. 4. – С. 65–69.

10. Журавков, М.А. Технологии компьютерного моделирования сдвижений земной поверхности / М.А. Журавков, О.Л. Коновалов, А.В. Круподеров // Теоретическая и прикладная механика. – 2009. – Вып. 24. – С. 142–147.

11. Круподеров, А.В. Аналитическое решение задачи определения напряженно-деформированного состояния полупространства при действии на него распределенной нормальной нагрузки / А.В. Круподеров, С.С. Щербаков //

Вестник БГУ. Сер. 1. – 2010. – № 2. – С. 17–21.

12. Журавков, М.А. О динамическом воздействии сосредоточенной силы в упругом изотропном пространстве со сферической полостью / М.А. Журавков, А.В. Круподеров // Вести национальной академии наук Беларуси, сер. физ.-тех. наук. – 2010. – № 3. – С. 56–62.

13. Zhuravkov, M.A. Dynamic load effect in the vicinity in the vicinity of goafs within rock masses / M.A. Zhuravkov, A.V. Krupoderov // Journal of Mining Science. – 2010. – Vol. 46. – № 3. – P. 241–249.

Материалы конференций

14. Complex analytical-experimental method for prognosis of the deformation and movement of rock mass and Earth surface/ M.A. Zhuravkov, O.L. Kononov, A.V. Krupoderov, A.F. Danilova // Proceedings of XIII International Congress of ISM 2007. Budapest, Hungary, 24-28 September 2007 [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. и прогр. – Budapest, 2007 – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): зв., цв.

15. Журавков, М.А. Проблемы численного моделирования сдвижения земной поверхности от влияния крупномасштабных горных работ/ М.А. Журавков, О.Л. Коновалов, А.В. Круподеров // Неравновесные процессы в сплошных средах: материалы всероссийской конференции(с международным участием), Пермь, Россия, 5-7 декабря 2007 г. / Пермский государственный университет. – Пермь, 2007. – С. 178–181.

16. Zhuravkov, M.A. The modeling of earth surface displacements in region of underground mining works by computer technologies / M.A. Zhuravkov, O.L. Kononov, A.V. Krupoderov // Proc. of XVII International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection. MPES 2008. Beijing, China, 22-24 October [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. и прогр. – Beijing, 2008 – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): зв., цв.

17. Круподеров, А.В. Компьютерные технологии моделирования сдвижений земной поверхности в регионе ведения горных работ / А.В. Круподеров // сборник трудов международной научно-технической конференции «Проблемы рационального природопользования», Пермь, Россия, 29-31 октября 2008 г. / Пермский государственный технический университет, отв. редактор И.А. Козлова. – Пермь, 2008. – С. 393–400.

18. Модели и подходы к решению задач изучения и прогнозирования гидрогеомеханических процессов в подработанных массивах калийных пород/ М.А. Журавков, О.Л. Коновалов, А.В. Круподеров, В.Э. Зейтц // Наукові праці УкрНДМІ: сборник трудов 2-й Международной научно-технической конференции «Горная геология, геомеханика и маркшейдерия», посвященной 80-летию УкрНИМИ, Донецк, Украина, 6-8 октября 2009 г. / УкрНими, отв. редактор А.В. Анциферов. – Донецк, 2009. – Ч. 1. – С. 144–149.

19. Журавков, М.А. Деформирование и разрушение массивов горных пород в окрестности подземных сооружений при воздействии волн деформаций и на-

пряжений. Некоторые классы модельных задач / М.А. Журавков, Н.В. Гайко, А.В. Круподеров // Наукові праці УкрНДМІ: збірник трудов 2-й Международной научно-технической конференции «Горная геология, геомеханика и маркшейдерия», посвященной 80-летию УкрНИМИ, Донецк, Украина, 6-8 октября 2009 г. / УкрНИМИ, отв. редактор А.В. Анциферов. – Донецк, 2009. – Ч. 1. – С. 114–123.

20. Modeling of connected geomechanical, hydromechanical and gasodynamic processes for potash minerals deposits / М.А. Zhuravkov, O.L. Kononov, A.V. Krupoderov, A.A. Kushunin // Proc. of XVIII International Symposium of Mine Planning and Equipment Selction, Alberta, Canada, November 16–19 2009. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. и прогр.(59,5 Мб). – Alberta, 2009. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM): зв., цв.

21. Журавков, М.А. Воздействие динамических источников в упругих изотропных средах с отверстиями / М.А. Журавков, А.В. Круподеров // Материалы IV Белорусского конгресса по теоретической и прикладной механике «Механика 2009», Минск, 22-24 декабря 2009 г. / Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, под общей ред. М.С. Высоцкого. – Минск, 2009. – С. 358–362.

22. Прогнозирование гидрогеомеханических процессов на основе метода конечных / М.А. Журавков, А.В. Круподеров, С.И. Богдан, О.Л. Коновалов // материалы IV Белорусского конгресса по теоретической и прикладной механике «Механика 2009», Минск, 22-24 декабря 2009 г. / Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, под общей ред. М.С. Высоцкого. – Минск, 2009. – С. 410–414.

23. Krupoderov, A.V. Using finite element method for prediction hydro mechanical and crack propagation processes in rock massive caused by mining / A.V. Krupoderov // Рабочие материалы международного форума-конкурса молодых ученых «Проблемы недропользования», Санкт-Петербург, Россия, 21-23 апреля 2010г./ Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова (технический университет). – СПб., 2010. – С. 142–145.

24. Zhuravkov, M.A. Determination of stress-strain state of rock massive caused by action of distributed on its surface loading / М.А. Zhuravkov, A.V. Krupoderov // Proc. of IV International Geomechanics Conference “Theory and practice of geomechanics for effectiveness the mining production and construction”, Varna, Bulgary, 3-6 June, 2010. – Varna, 2010 – P. 109–117.

25. Круподеров, А.В. Воздействие поверхностной нагрузки на многослойное трансверсально-изотропное полупространство / А.В. Круподеров, М.А. Журавков // Материалы XVIII Международной научно-технической конференции «Прикладные задачи математики и механики», Севастополь, Украина, 13-17 сентября 2010 г. / Севастопольский национальный технический университет, научный редактор Ю.Е. Обжерин. – Севастополь, 2010. – С. 54–57.

Тезисы докладов

26. Журавков, М.А. Математическое моделирование перемещений земной поверхности в регионе ведения крупномасштабных горных работ / М.А. Журавков, А.В. Круподеров // Тезисы докладов Международной научной конференции «10-я Белорусская математическая конференция», Минск, 3-7 ноября 2008 г. / БГУ, редакторы: С.Г. Красовский, А.А. Лепин. – Минск, 2008. – С. 116.

27. Прочность и разрушение деформируемых сред при воздействии динамических нагрузок / М.А. Журавков, Ю.М. Плескачевский, А.В. Круподеров, Н.Г. Чумак // Тезисы докладов Международной научной конференции «10-я Белорусская математическая конференция», Минск, 3-7 ноября 2008 г. / БГУ, редакторы: С.Г. Красовский, А.А. Лепин. – Минск, 2008. – С. 118–120.

28. Круподеров, А.В. Использование компьютерных технологий в задачах геомеханики / А.В. Круподеров // Рабочие материалы международного форума-конкурса молодых ученых «Проблемы недропользования», Санкт-Петербург, Россия, 22-24 апреля 2009 г. / Санкт-Петербургский государственный горный институт им. Г.В. Плеханова (технический университет). – СПб., 2009. – С. 59.

29. Журавков, М.А. О динамическом воздействии сосредоточенной силы в упругом пространстве со сферической полостью / М.А. Журавков, А.В. Круподеров // Аналитические методы анализа и дифференциальных уравнений: Тез. докл. международной конф., Минск, 14-19 сент. 2009 г. / Минск: ИМ НАНБ. – Минск, 2009. – С. 68.

РЭЗІЮМЭ

Крупадзераў Андрэй Валянцінавіч

Рашэнне задач геамеханікі на аснове фундаментальных рашэнняў механікі суцэльнага асяроддзя

Ключавыя словы: напружана-дэфармаваны стан, дэфармацыйныя працэсы, масіў горных парод, трансверсальна-ізатропнае паўпрастора, фундаментальныя рашэнні, геамеханічныя працэсы, аналітычнае і камп'ютэрнае мадэляванне.

Аб'ект даследавання: пародная тоўшча і масіў горных парод, які схільны да рознага роду тэхнагенных уздзеянняў і разгледжваецца як аб'ект механікі цвёрдага дэфармаванага цела.

Мэта работы: на аснове метадаў, падыходаў і тэорый механікі дэфармаванага цвёрдага цела і выкарыстоўваючы апарат матэматычнага і камп'ютэрнага мадэлявання, у прыватнасці фундаментальныя рашэнні тэорый пругкасці, стварэнне эфектыўных метадык і тэхналогій для рашэння наступных актуальных класаў тэарэтычных і прыкладных задач геамеханікі: вывучэнне НДС пароднага масіва з прычыны дзеяння на яго павярхоўнай (павярхоўныя збудаванні) і падземнай (падземныя збудаванні) нагрузак; даследаванне спалучаных гідрагеамеханічных працэсаў, якія выкліканы вядзеннем падземных горных прац; пабудова рашэнняў некаторых класаў задач пра дзеянне дынамічных нагрузак імпульснага характару ў масівах горных парод з падземнымі збудаваннямі.

У працы вырашаны наступныя задачы: 1) на аснове фундаментальных рашэнняў тэорый пругкасці пабудаваны рашэнні для вызначэння НДС пароднай тоўшчы ў набліжэнні яе як пругкай ізатропнай, так і трансверсальна-ізатропнай паўпрасторай пры дзеянні на яе паверхні нагрузкі адвольнага выгляду; 2) на аснове фундаментальных рашэнняў тэорый пругкасці пабудаваны рашэнні для даследавання змен НДС на паверхні і ў прыпаверхнасных вобласцях пароднай тоўшчы, якія абумоўлены наяўнасцю і развіццём падземных горных збудаванняў (выпрацовак); 3) на аснове фундаментальных рашэнняў дынамічнай тэорый пругкасці пабудаваны рашэнні для некаторых тыпаў мадэльных задач пра вывучэнне НДС у масівах горных парод з падземнымі збудаваннямі пры ўздзеянні на масіў дынамічных нагрузак імпульснага характару; 4) распрацаваны метадыкі для вылучэння ў масіве горных парод з падземнымі збудаваннямі абласцей, якія змешчаюцца ў розным структурным стане, і вызначэння НДС па ўсёй тоўшчы масіва горных парод; 5) на аснове метадаў механікі суцэльных асяроддзяў з улікам узаемаўплыву вадкай і цвёрдай фаз пабудаваны рашэнні для некаторых задач даследавання спалучаных гідрагеамеханічных працэсаў у пародным масіве з падземнымі збудаваннямі.

РЕЗЮМЕ

Круподеров Андрей Валентинович

Решение задач геомеханики на основе фундаментальных решений механики сплошных сред

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, деформационные процессы, массив горных пород, трансверсально-изотропное полупространство, фундаментальные решения, геомеханические процессы, аналитическое и компьютерное моделирование.

Объект исследования: породная толща и массив горных работ, подверженный различного рода техногенным воздействиям, рассматриваемый как объект механики деформируемого твердого тела.

Цель работы: на основе методов, подходов и теорий механики деформируемого твердого тела и используя аппарат математического и компьютерного моделирования, в частности фундаментальные решения теории упругости, создание эффективных методик и технологий для решения следующих актуальных классов теоретических и прикладных задач геомеханики: изучение НДС породного массива вследствие действия на него поверхностной (поверхностные сооружения) и подземной нагрузок (подземные сооружения); исследование сопряженных гидрогеомеханических процессов, вызванных ведением подземных горных работ; построение решений некоторых классов задач о действии динамических нагрузок импульсного характера в массивах горных пород с подземными сооружениями.

В работе решены следующие задачи: 1) на основе фундаментальных решений теории упругости построены решения для определения НДС породной толщи в приближении ее как упругим изотропным, так и трансверсально-изотропным полупространством при действии на ее поверхности нагрузки произвольного вида; 2) на основе фундаментальных решений теории упругости построены решения для исследования изменений НДС на поверхности и в приповерхностных областях породной толщи, обусловленных наличием и развитием подземных горных сооружений (выработок); 3) на основе фундаментальных решений динамической теории упругости построены решения для некоторых типов модельных задач об изучении НДС в массивах горных пород с подземными сооружениями при воздействии на массив динамических нагрузок импульсного характера; 4) разработаны методики для выделения в массиве горных пород с подземными сооружениями областей, находящихся в различном структурном состоянии, и определения НДС по всей толще массива горных пород; 5) на основе методов механики сплошных сред с учетом взаимовлияния НДС жидкой и твердой фаз построены решения для некоторых задач исследования сопряженных гидрогеомеханических процессов в породном массиве с подземными сооружениями.

SUMMARY

Krupoderov Andrey Valentinovich

Solving of problems of geomechanics on base of fundamental solutions of mechanics of continuum media

Key words: stress-strain state, deformation processes, rock massive, transversely isotropic half-space, fundamental solutions, geomechanical processes, analytical and computer modelling.

Object of research: rock massive, subjected to technogeneous action and considered as object of mechanics of rigid deformable body.

The purpose of work: the development of effective methods and technologies for solving following problems: analysis of stress-strain state of rock massive, caused by surface (over ground buildings) and underground loads; investigation of conjugate hydrogeomechanical processes, caused by mining; construction of solutions of some problems of action of dynamic impulse load in rock massif with underground constructions on the base of methods of mechanics of deformable rigid body and by using mathematical and computer modeling.

The following problems were solved in this work: 1) solutions for determination of stress-strain state of rock massive caused by surface loading, when massive considered as isotropic and transversely-isotropic half space, were constructed on the base of fundamental solutions of elasticity theory; 2) solutions for determination of strain state of near surface zones of rock massive, caused by mining, were constructed on the base of fundamental solutions of elasticity theory; 3) solutions of some model problems of action of dynamic impulse load in rock massive with underground constructions were constructed on base of fundamental solutions of dynamic elasticity theory; 4) the methods of analysis of crack zones and determination of stress-strain state in any region of rock massive were developed; 5) on the base of methods of mechanics of continuum media by taking into account two-way influence of rock massive and fluid solutions for some problems of investigation of conjugated hydrogeomechanical processes in rock massive with underground constructions were developed.